

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



COMPARACIÓN ENTRE DOS TIPOS DE  
SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO PARA LA  
PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

APLICACIÓN EN UN CULTIVO DE CAQUI “ROJO  
BRILLANTE” EN LA COMARCA DE LA RIBERA  
BAJA DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ALUMNO:

Antoine Fernández

TUTORES:

Pablo González Altozano

Juan Manzano Juárez

*Curso Académico 2017/2018*

**VALENCIA, abril de 2018**

## RESUMEN:

La programación del riego es una herramienta esencial para la gestión eficiente de la irrigación y el ahorro del agua. Tradicionalmente, la programación del riego semanal se realiza siguiendo la metodología FAO-56, que utiliza las variables microclimáticas de la zona y los datos climáticos de la semana anterior. Esta metodología es muy exigente en cálculos y se alimenta de información climática, siendo necesaria la presencia de una estación agroclimática en las proximidades de la zona de aplicación. Además, esta metodología es muy dependiente del coeficiente de cultivo, el cual se determina de manera empírica para cada cultivo y cada zona de aplicación con cierto grado de error. Cuando se introduce un cultivo novedoso en una zona en que tradicionalmente no se cultivaba, como el caso del caqui “Rojo brillante” en la Ribera Baja del Júcar (Comunidad Valenciana), son necesarios ensayos de varios años para ajustar adecuadamente los parámetros que permiten determinar las dosis de riego con precisión. Actualmente se están generalizando soluciones tecnológicas de medición de la humedad del suelo que facilitan la adopción de decisiones en la programación del riego que permiten optimizar el uso del agua de riego. Estas tecnologías presentan la ventaja de medir la humedad del suelo de forma continua y permitir la programación del riego mediante la visualización directa de la dinámica del agua en el mismo.

En el presente estudio, se ha realizado la instalación de dos tipos de sondas de humedad FDR, en un campo de caqui “Rojo brillante” en la finca experimental Sinyent de la asociación de productores AVA-ASAJA, en Polinyà del Xúquer (Ribera Baja del Júcar, Valencia). Se han instalado sondas capacitivas EnviroScan® de la marca australiana Sentek® y sondas 10HS de la marca comercial Decagon Devices®. Tras 5 meses de estudio (de junio a octubre), se ha realizado una comparación de la programación del riego semanal a partir de la información de la semana anterior utilizando los tres métodos siguientes, el primero basado en la información climática, el segundo en las lecturas de la sonda EnviroScan® y el tercero en las lecturas de la sonda 10HS. El análisis de las lecturas de las sondas de humedad ha permitido realizar la programación del riego semanal de manera más sencilla. La visualización de la dinámica de la humedad del suelo, además de aportar una gran cantidad de información adicional, ha permitido tener un control más adecuado del riego. Durante los 5 meses de estudio, la programación del riego basada en las sondas de humedad ha mostrado unos ahorros importantes en la dosis de agua a aplicar, observándose un ahorro promedio de 40 % con la sonda EnviroScan® y de 25 % con la 10HS respecto a la programación basada en los datos climáticos.

## Palabras clave:

Programación del riego, Caqui “Rojo brillante”, sonda de humedad, FDR, sonda capacitiva, ahorro de agua, EnviroScan®, Irrimax®, Sentek®, 10HS, Decagon Devices®.

## ABSTRACT:

Nowadays, irrigation scheduling is a key tool for efficient irrigation management and water saving. Traditionally, irrigation scheduling is carried out following the FAO-56 methodology that uses the microclimatic variables of the area and the previous week's climate data. This method requires many calculations and a vast collection of climatic data. Therefore, the presence of an agro-weather station nearby the area of application is essential. Besides, this methodology depends a lot on the accuracy of the crop coefficient that is established in an empirical way for each crop and area of application with a certain degree of error. When a new culture is introduced in an area in which it is not traditionally cultivated — as seen in the case of the persimmon “Rojo brillante” in Ribera del Júcar (Valencia) — several years of experimental trials are required in order to properly adjust the parameters that allow determining the accurate dose of irrigation. Currently, the generalization of the use of new technological solutions for soil moisture measurement helps the decision-making in the irrigation scheduling and allows the optimization of the use of water. These technologies have the advantage of measuring directly the soil moisture continuously and allowing the visualization of the dynamics of water in the soil in real time.

In the present study, two different types of soil moisture capacitive probes (FDR) were installed in a crop of persimmon “Rojo brillante” in the association of producers AVA-ASAJA's experimental farm Sinyent, in Polinyà del Xúquer (Ribera Baja del Júcar, Valencia). The equipment used are the probe EnviroScan® from Sentek® (Australia) and the probe 10HS from Decagon Devices®. After 5 months of study (from June to October), a comparison of the weekly irrigation scheduling based on each method (climatic information, EnviroScan® probe and 10HS probe) was made. The use of the soil moisture probe has allowed to schedule and manage the irrigation more easily thanks to the visualization of the water dynamics in the soil. During the 5 months of the study, the irrigation scheduling based on the capacitive probes has showed interesting results about water saving. With the EnviroScan® probe, an average of 40 % percent of the irrigation dose was saved, while with the 10HS probe, an average of 25 % of irrigation dose was saved.

## Key words:

Irrigation scheduling, persimmon “Rojo brillante”, soil moisture probe, FDR, capacitive probe, water saving, EnviroScan®, Irrimax®, Sentek®, 10HS, Decagon Devices®.

### AGRADECIMIENTOS:

Al Dr. Pablo González Altozano por la dirección académica y experimental que ha conllevado este trabajo. Por su seguimiento y ayuda en la realización del trabajo. Gracias por su apoyo y dedicación.

Al Dr. Juan Manzano Juárez por la dirección académica y experimental que ha conllevado este trabajo. Por su seguimiento y ayuda en la realización del trabajo. Gracias por su apoyo y dedicación.

Al Dr. Luis Bonnet Pérez de León, del IVIA, por su ayuda en la realización experimental del trabajo y por su apoyo y dedicación.

A Alba Esteban Hernández, Amparo Martínez Gimeno y Carlos Albert González, por su ayuda en la realización experimental del trabajo

Al Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA y a la asociación de productores AVA-ASAJA cuyos equipos e instalaciones han permitido la realización experimental de este trabajo.

A Marie-Claude Sonzini, Charlotte Fernández y Alain Fernández, por sus correcciones, sus observaciones pertinentes y su apoyo.

## Índice

---

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....	1
1.1. Antecedentes de uso de sondas de capacitancia en la comunidad valenciana.....	3
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	5
3. CARACTERIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN Y DEL CULTIVO.....	6
3.1. Caracterización de la zona de estudio .....	6
3.2. Caracterización de la parcela de estudio .....	7
3.3. Caracterización de la parcela de estudio .....	9
4. TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.....	13
4.1. La programación del riego basado en el balance del agua y en los parámetros climáticos...	13
4.2. La programación del riego basado en las medidas del estado hídrico de la planta.....	15
4.3. La programación del riego basado en las medidas de la humedad del suelo .....	15
4.4. Elección de la tecnología para el caso de estudio.....	19
5. SOLUCIONES PLANTEADAS.....	20
5.1. Primera solución: la sonda de humedad EnviroScan® de Sentek® .....	20
5.2. Segunda solución: la sonda de humedad 10HS de Decagon Devices®.....	27
5.3. Opinión sobre el manejo de cada sonda de humedad .....	31
6. APLICACIÓN EN CAMPO.....	33
6.1. Comparaciones de los parámetros determinantes obtenidos con los distintos métodos de programación del riego.....	34
6.2. Determinación del ahorro de agua con una programación del riego basada en medidas de la humedad del suelo respecto a una programación basada en datos climáticos .....	36
7. RECOMENDACIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO BASADA EN LA SONDAS.....	38
7.1. Valoración económica .....	39

## Índice de figuras

---

Figura 1. Respuesta de la producción de un cultivo al riego .....	1
Figura 2: Información agroclimática mensual en la parcela de estudio, temperatura media, ET0 media, precipitación y precipitación efectiva, datos medios sobre un periodo de 10 años.....	6
Figura 3: Textura del suelo de la parcela de estudio, a profundidades de 20, 50, 80, 130 y 160 cm .....	8
Figura 4: Coeficientes de cultivo experimental obtenidos por el IVIA, para el caqui “Rojo brillante” en la comunidad valenciana. (Fuente: IVIA, “El cultivo del caqui”, 2015) <sup>10</sup> .....	12
Figura 5: Configuraciones de sondas de humedad con tecnología FDR.....	18
Figura 6: Solución tecnológica EnviroScan® de Sentek®.....	20
Figura 7: Solución tecnológica EnviroScan® de Sentek®. Instalación en campo .....	21
Figura 8: Representación grafica de las lecturas de la sonda EnviroScan® con el programa Irrimax® 10 .....	24
Figura 9: Esquema de la interpretación graficas de las lecturas de las sondas EnviroScan®. ....	25
Figura 10: Grafico sumatorio y líneas de gestión determinadas con Irrimax® 10 .....	25
Figura 11: Información proporcionada por el Irrimax® 10 para la programación semanal del riego. .	27
Figura 12: Sonda 10HS y datalogger Em50 de Decagon Devices® .....	28
Figura 13: Resultados de las líneas de gestión, con Office Excel® 2016. ....	30
Figura 14: Representación grafica de las lecturas de la sonda 10HS, con Office Excel® 2016 para la programación semanal del riego .....	30
Figura 15: Numero de días de riego promedios, semanales y mensuales según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas $p<0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a $p<0,01$ ) .....	35
Figura 16: Intervalo entre riegos semanal promedio, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas $p<0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a $p<0,01$ ) .....	35
Figura 17: Tiempo de riego promedio semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas $p<0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a $p<0,01$ ) .....	36
Figura 18: Dosis de riego promedia, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas $p<0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a $p<0,01$ ) .....	36
Figura 19: Dosis de riego promedia, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas $p<0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a $p<0,01$ ) .....	37

## Índice de tablas

---

Tabla 1: Coeficientes de cultivo experimental obtenidos por el IVIA, para el caqui “Rojo brillante” en la comunidad valenciana. (Fuente: IVIA, “El cultivo del caqui”, 2015).....	11
Tabla 2. - Tabla recapitulativa de los resultados semanales del número de riego, el intervalo entre riegos, el tiempo de riego y la dosis de riego, de las programaciones del riego a partir de los datos climáticos, de las medidas de la humedad del suelo con la sonda EnviroScan y con la sonda 10HS .....	33
Tabla 3. - Tabla recapitulativa de los resultados mensuales y totales del número de riego, el intervalo entre riegos, el tiempo de riego y la dosis de riego, de las programaciones del riego a partir de los datos climáticos, de las medidas de la humedad del suelo con la sonda EnviroScan y con la sonda 10HS...	34

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El riego es el factor principal de producción y calidad en cultivos en zonas de clima árido, semiárido y mediterráneo, donde las precipitaciones son variables y escasas y los riesgos de sequía pueden tener consecuencias graves en la renta agraria. En Europa se dedica en media un 24% del agua disponible al regadío (AQUASTAT, 2017), no obstante países europeos con climas mas árido pueden llegar a dedicar el 80 % del agua disponible al regadío, como es caso de España (AQUASTAT, 2017)<sup>1</sup>.

En estas mismas zonas, el agua de riego es un recurso limitado y se convierte en el principal factor limitante de la producción agraria. En un clima actual de cambio climático y concienciación del valor del agua como recurso limitado, se sobreentiende que el buen manejo del riego se ha convertido en una necesidad.

También es importante tomar en cuenta que el inadecuado manejo del riego puede causar pérdidas económicas y problemas medioambientales. Los riegos excedentarios, además de suponer pérdidas por el coste creciente del agua y de la energía necesaria para bombearlo, causan lavados de fertilizantes y de agentes químicos. La percolación profunda puede causar la salinización del suelo y la contaminación de acuíferos. Por lo tanto, el adecuado manejo del riego es una herramienta esencial para reducir los costes de producción, mejorar la productividad de la tierra agrícola y reducir los riesgos de contaminación.

El efecto del riego sobre la producción de un cultivo sigue una dinámica de productividad típica (Figura 1). Es decir que el agua aportado para lograr la máxima producción no significa una rentabilidad máxima.

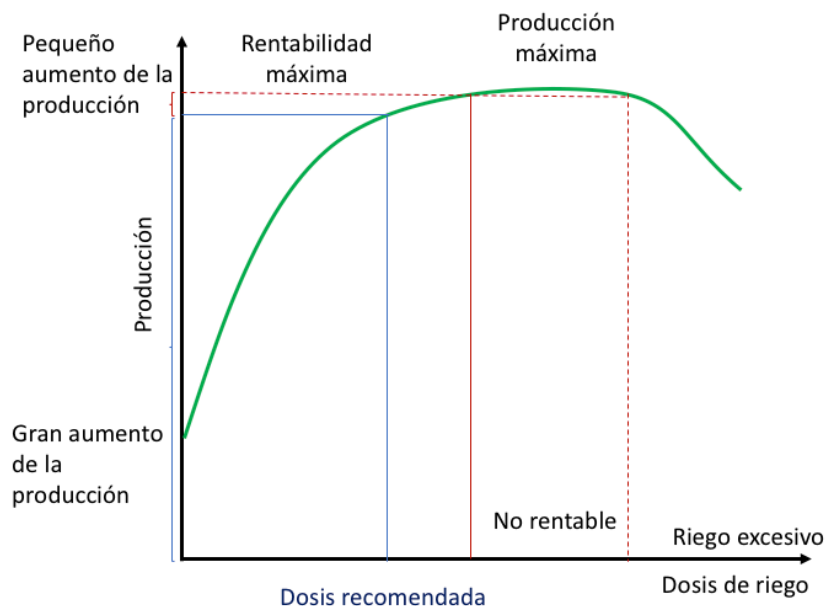


Figura 1. Respuesta de la producción de un cultivo al riego

La producción de un cultivo aumenta rápidamente con un riego creciente, hasta estabilizarse cuando se acerca a la producción máxima del cultivo. Luego, por mucho riego adicional que se aporte, la

<sup>1</sup> AQUASTAT. FAO's Information System on Water and Agriculture  
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexfra.stm>. (Consulta Marzo de 2018)



producción no mejora, incluso disminuye por el efecto del exceso de agua, el encharcamiento y la asfixia radicular. La dosis de riego óptima en cuanto a rentabilidad es menor que la aportada para lograr la máxima producción. La técnica del riego deficitario busca lograr la rentabilidad máxima aplicando riegos menores a los necesarios para satisfacer las necesidades hídricas de las plantas.

La principal herramienta de gestión de la irrigación es la programación del riego. Una metodología que permite decidir, a partir de la información del balance hídrico del suelo, la dosis de riego y el momento de aplicación óptimo para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo en cada época del año y fase del cultivo, sin causar pérdidas.

Existen varias metodologías para realizar la programación del riego, las cuales se diferencian por la fuente de información que utilizan y la tecnología necesaria para obtener dicha información. Las tres metodologías son:

1. La programación del riego basada en la información agroclimática de la zona y del cultivo
2. La programación del riego basado en la medida del contenido hídrico del suelo
3. La programación del riego basado en la medida del estado hídrico del cultivo.

La metodología más estudiada y extendida en el mundo, es la basada en la información agroclimática de la zona de aplicación. Se basa en la determinación de las necesidades hídricas del cultivo a partir de la determinación del balance hídrico del conjunto planta-atmósfera-suelo. Mediante la información pertinente sobre los datos climáticos de la zona de aplicación, el coeficiente de cultivo (que representa las necesidades del cultivo en la zona de aplicación) y las características del suelo, se determina matemáticamente la dosis de riego a aplicar al cultivo según las condiciones en el momento del cálculo.

Dicha metodología presenta la ventaja de ser ampliamente descrita en documentos científicos y de vulgarización, principalmente por el libro 56 de la FAO. Ha sido adaptada a muchos cultivos y zonas del mundo por los centros de investigación agrarios. Lo cual hace de ella una metodología robusta para la programación del riego.

No obstante, el uso de este método presenta en ciertas condiciones, dificultades de aplicación y falla en cuanto a fiabilidad. Primero, es un método muy exigente en cuanto a información climática, siendo necesario disponer de una estación agroclimática próxima a la zona de aplicación. Además, el coeficiente de cultivo es determinado empíricamente mediante la experimentación para un cultivo en una zona concreta. Por lo tanto, cuando el cultivo o la zona de aplicación son diferentes de los previamente descritos, no es posible adaptar el método de manera fiable, sino que es necesario el ensayo y experimentación. Por último, esta metodología es no solo muy exigente en cálculos, pudiendo ocurrir errores, pero tampoco permite determinar con exactitud el momento y la dosis de riego óptimos en cada momento. El fraccionamiento se realiza de manera arbitraria en el momento del cálculo.

Desde hace 15 años, se está expandiendo, en la provincia de Valencia, el cultivo del caqui “Rojo brillante”, principalmente cultivado en la Ribera Baja del Júcar. Esta expansión es principalmente debida a dos factores, la aparición de técnicas post cosecha que permiten eliminar la astringencia del fruto, permitiendo comercializarlo duro. Y la creación de la denominación de origen protegida Persimmon® Ribera del Xúquer. Estos dos factores han permitido dar al caqui “Rojo brillante” un gran valor añadido, y se presenta en la actualidad como un cultivo de reemplazo frente a la crisis de los cítricos valencianos.

La Ribera Baja del Júcar donde se cultiva la gran parte del caqui “Rojo brillante”, es una zona donde la gran mayoría de la superficie es dedicada a la agricultura de regadío, con los cítricos como cultivo principal y tradicional. La aparición de un cultivo novedoso como el caqui ha presentado cuestiones en cuanto al manejo del riego, por la falta de conocimiento y de bibliografía. Al principio los productores aplicaban las pautas de riego de los cítricos. Fue necesarios ensayos e investigaciones de varios años por parte del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA, para determinar a partir de 2009

unas pautas de riego adaptadas al caqui “Rojo brillante” en la Ribera Baja del Júcar. Actualmente, se siguen realizando experimentos y se sigue aprendiendo del manejo del riego en dicho cultivo.

Durante los últimos años, se han desarrollado tecnologías para la medida de la humedad del suelo que permiten realizar una programación del riego alternativa de manera fiable. El uso de estas tecnologías, principalmente representadas por las sondas de capacitancia (FDR), se está expandiendo desde hace unos años en el mundo, tanto en centros de investigación como en producciones comerciales.

Las sondas de capacitancia permiten la medición directa del contenido volumétrico de agua en el suelo y su visualización en tiempo real. Esta tecnología permite realizar una programación del riego en tiempo real, adecuando los aportes hídricos según las necesidades hídricas de la planta en cada momento. Consiguiéndose así limitar las pérdidas de agua a la única absorción radicular de la planta, lo cual se traduce en una herramienta que facilita la toma de decisiones en cuanto a la dosis de riego y el momento de aplicación óptimo del riego, y evitar las pérdidas por percolación y los consiguientes problemas que acarrea. Esta metodología del riego presenta ciertas ventajas respecto a la demás, siendo aplicable directamente a cualquier cultivo y zona, sin necesidad de cálculos o información adicional. Cabe destacar que dicha tecnología, es actualmente considerada una herramienta esencial para el ahorro de agua y la mejora de la productividad agraria, además de permitir la automatización del riego.

En la actualidad, las sondas de capacitancia se están utilizando en investigación para controlar experimentos y ensayos sobre pautas de riego óptimas para cada cultivo, la determinación del coeficiente de cultivo  $K_c$ , y experimentos de riego deficitario.

Actualmente, se están realizando unos ensayos de control del riego en el cultivo de caqui “Rojo brillante” basado en sondas de humedad en una parcela de la finca Sinyent (Ribera Baja del Júcar), dentro de una colaboración entre el Instituto de Investigaciones Agrarias IVIA, la Universidad Politécnica de Valencia, UPV y la asociación de productores AVA-ASAJA.

La finca experimental Sinyent de la asociación de agricultores AVA-ASAJA, situada en el término municipal de Polinyà del Xúquer (Ribera Baja de Júcar, Valencia), tiene como objetivo la integración de nuevos cultivos y nuevas técnicas agrícolas en la comunidad valenciana. Su objetivo se realiza mediante la experimentación agrícola y la transmisión de la innovación y de los conocimientos a los productores de la zona. En la finca se encuentran cultivadas diversas especies y variedades sobre las cuales realizan ensayos con el fin de determinar que especies, variedades, y técnicas agronómicas se adaptan mejor a la Comunidad Valenciana.

La finca está formada por 20 parcelas con una superficie total agrícola de 180.350 m<sup>2</sup> con más de 10 cultivos, cuenta con sistemas modernos de regadío y fertirrigación. Actualmente, se está investigando la irrigación del cultivo del caqui “Rojo brillante” mediante el uso de sondas de humedad, experimento en el cual se apoya este trabajo.

### 1.1. Antecedentes de uso de sondas de capacitancia en la comunidad valenciana

El uso de las sondas de humedad para la programación del riego y la experimentación ha sido principalmente impulsado en la comunidad valenciana por el IVIA, quien, durante los últimos años ha llevado a cabo experimentos y ha realizado programaciones del riego apoyados en el uso de sondas capacitivas, en varias zonas y cultivos, con el fin de la investigación y de la restitución a los productores.

Dichos ensayos han permitido determinar pautas de riego optimas de cultivos tales los cítricos<sup>2</sup>, el caqui<sup>3</sup> y el granado<sup>4</sup> entre otros.

El IVIA, también ha realizado estudios en colaboración con doce sociedades de riego de la comunidad valenciana, sobre uso de sondas capacitivas en varios cultivos de la comunidad valenciana, para el control del riego y el ahorro de agua que conlleva<sup>5</sup>.

En otras partes del mundo el uso de las sondas de capacitancia para la programación y la gestión del riego se expande de manera certera en producciones comerciales. En Francia, se utilizan para diverso cultivos, herbáceos, forrajes y frutales. En Córcega, los productores de clementinas de Córcega han adoptado en gran mayoría esta tecnología.

---

<sup>2</sup> Ferrer, P., Castel, J. R., & Intrigliolo, D. S. (2010). Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards?. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S2), 52-65.

<sup>3</sup> Bonet, L., Buesa, I., Ferrer, P. J., & Intrigliolo, D. S. (2011) Obtención de una pauta de riego eficiente para el cultivo del caqui (*Diospyros kaki*) empleando indicadores del continuo suelo-planta-atmósfera

<sup>4</sup> Bonet L.; Bartual J.; Intrigliolo D.S. (2012). Aproximación a la pauta de riego óptimo en granado. *Horticultura global*, (301), 22.

<sup>5</sup> Adam, V., Ferrer, P. J., Bonet, L., Vera, J., Senchermés, J., & Sanz, E. (2008) El uso de sondas capacitivas multisensor en comunidades de regantes y el ahorro de agua en la comunidad valenciana.

## 2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es la puesta en funcionamiento de un sistema de programación del riego basado en la medida del contenido hídrico del suelo mediante sondas de humedad en un cultivo de caqui “Rojo Brillante” en una parcela de 2,3 hectáreas de la finca Sinyent de la asociación de agricultores AVA-ASAJA, situada en el término de Polinyà del Xúquer, en la Ribera Baja de la Comunidad Valenciana.

El objetivo secundario de este trabajo es la comparación entre distintos métodos de programación del riego, a partir de la información obtenida durante 5 meses tras la instalación del sistema. Los distintos métodos son, la programación del riego basada en los datos climáticos y la programación del riego basada en la medida de la humedad del suelo según dos tipos de sondas de humedad.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN Y DEL CULTIVO

#### 3.1. Caracterización de la zona de estudio

La parcela de estudio se sitúa en el termino municipal de Polinyà del Xúquer, en la Ribera Baja de río Júcar en la provincia de Valencia. El término municipal de Polinyà del Xúquer (coordenadas: 39° 12' N, 0° 22' W) es uno de los 11 municipios que forman la comarca de la Ribera Baja en la comunidad Valenciana. Se sitúa a 38 km de la ciudad de Valencia, tiene una superficie de 9,18 km<sup>2</sup> y una altitud de 14 m por encima del nivel del mar. Está situado en una llanura aluvial formado por el río Júcar. Prácticamente la totalidad del territorio está dedicado a la agricultura de regadío, principalmente a los cítricos. **(Ver Planos 1,2 y 3 – Situación, emplazamiento y catastral)**

##### a) *Caracterización del clima de la zona de Polinyà del Xúquer*

En la figura 2, se presentan las variables climáticas mensuales medias de un periodo de 10 años, de temperatura media, precipitación y precipitación efectiva, y evapotranspiración de referencia en la parcela de estudio. **(Ver Anejo 2)**

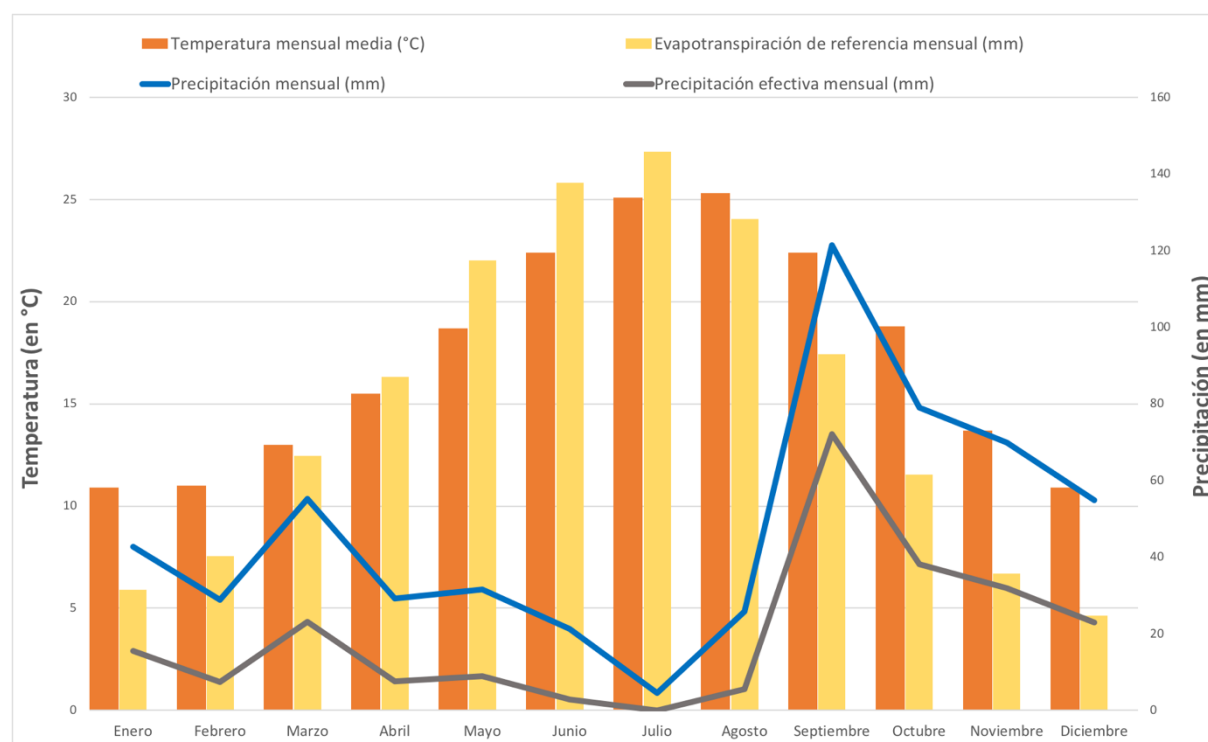


Figura 2: Información agroclimática mensual en la parcela de estudio, temperatura media, ET0 media, precipitación y precipitación efectiva, datos medios sobre un periodo de 10 años

Según la clasificación climática de Papadakis (1952), el tipo de clima de la zona donde se sitúa la parcela de estudio es Mediterráneo subtropical, con un verano de tipo g (Algodón menos cálido) y un invierno de tipo Citrus. **(Ver Anejo 2, punto 7)**

##### b) *Cultivos en la Ribera Baja de Júcar*

La gran mayoría de la superficie de la Ribera baja del Júcar esta dedicada al uso agrícola de regadío. El cultivo de los cítricos en regadío es muy dominante. La agricultura de especies herbáceas en regadío también esta representada. Como cultivo menor, aparecen los frutales no cítricos en regadío, principalmente representados por el caqui “Rojo brillante”. **(Ver Anejo 1, punto 5)**

c) Suelos en la Ribera Baja de Júcar

La Ribera Baja del Júcar donde se sitúa el término de Polinyà del Xúquer está formada por suelos aluviales debido a la proximidad del río Júcar. Estos suelos son típicos de la ribera Valenciana. Según la taxonomía de suelos de la USDA los suelos de la zona pertenecen al Orden de los Entisoles y suborden Fluvents. Los suelos Fluvents son jóvenes y se han desarrollado sobre materiales aluviales estratificados. Son suelos muy fértiles típicos de los deltas de los ríos. Presentan un contenido de carbono orgánico apreciable, distribuido de manera irregular con la profundidad del suelo. Los suelos de la zona son originarios del Cuaternario y son esencialmente de naturaleza aluvial y fondo de ramblas procedentes de llanuras inundadas, caracterizados por la alta presencia de arcillas blandas. **(Ver Anejo 1, punto 4.1)**

d) Topografía de la zona de Polinyà del Xúquer

El municipio se encuentra en una llanura aluvial formada por el río Júcar, por lo cual la topografía del terreno es completamente llana. Toda la superficie de regadío se encuentra en una cota idéntica.

e) Vulnerabilidad de los acuíferos en la zona de Polinyà del Xúquer

Según el mapa de riesgos de CITMA, la vulnerabilidad de los acuíferos de la zona es alta. **(Ver Anejo 1, punto 6).**

f) Disponibilidad y calidad del agua en la zona de Polinyà del Xúquer

Las parcelas productivas situadas en la Ribera Baja son alimentadas por el propio río Júcar. El aprovechamiento del agua para riego y uso doméstico es otorgado por Confederación Hidrográfica del Júcar.

Según el análisis de agua, la calidad del agua de los aprovechamientos disponibles para el riego de la totalidad de la superficie es apta para su utilización en el riego de los cultivos implantados. **(Ver Anejo 1, punto 7)**

### 3.2. Caracterización de la parcela de estudio

a) Ubicación de la finca Sinyent y de la parcela de estudio

La explotación de caqui (coordenadas: 39° 11' 44.60'' N 0° 23' 21.10'' W) donde se realiza el estudio es la parcela 161 del polígono 1 del Gual de Polinyà del Xúquer. Tiene una superficie de 23.605 m<sup>2</sup>. En ella está en explotación una plantación de caquis (*Diospyros kaki*.) de variedad "Rojo Brillante".

Para llegar a la parcela partiendo de la Ciudad de Valencia por el sur, se sigue la avenida d'Ausiàs March hacia la dirección Entidad Ponce y la carretera V-31. Luego incorporarse a la autopista E-15/AP-7 en dirección de Alicante/A-38 y la carretera V-31 y E-15 en dirección Carrer de Valencia/AP-7. Seguir por la AP-7 y tomar la salida 58, en dirección a Alzira/CV-42. Seguir por la carretera CV-512, luego por la CV-505 y tomar la CV-507, hasta llegar a la finca Sinyent y a la parcela. **(Ver Anejo 1, punto 2.3)**

b) Estructura de la finca Sinyent

La finca experimental Sinyent se encuentra en la partida Gual del término municipal de Polinyà del Xúquer (Valencia) y está formada por 20 parcelas con una superficie total agrícola de 180.350 m<sup>2</sup> con más de 10 cultivos, tales como cítricos, frutales de hueso, kiwi, uva de mesa y de vinificación y hortalizas entre otros.

### c) Suelos de la parcela de estudio

En la figura 3, se presentan los resultados del análisis de suelo de la parcela de estudio, realizado a partir de varias muestras procedentes de varias profundidades, 20, 50, 80, 120 y 180 cm.

Siguiendo los criterios de la USDA, la textura de los primeros 50 cm de profundidad es de textura arcillosa, con una preponderancia de arcillas (45%) y limos (35 %) a costa de las arenas (20 %). Entre los 50 y 80 cm, el suelo presenta un cambio de textura a franco arcillosa, con una preponderancia de arenas (40 %) y arcillas (35 %) a costa de los limos (20 %). A mayor profundidad, 160 cm, el suelo presenta un nuevo cambio de textura a arcillosa, parecida a la textura de los primeros 50 cm, con 40 % de arcillas, 35 % de limos y 25 % de arenas. **(Ver Anejo 1, punto 4.2)**

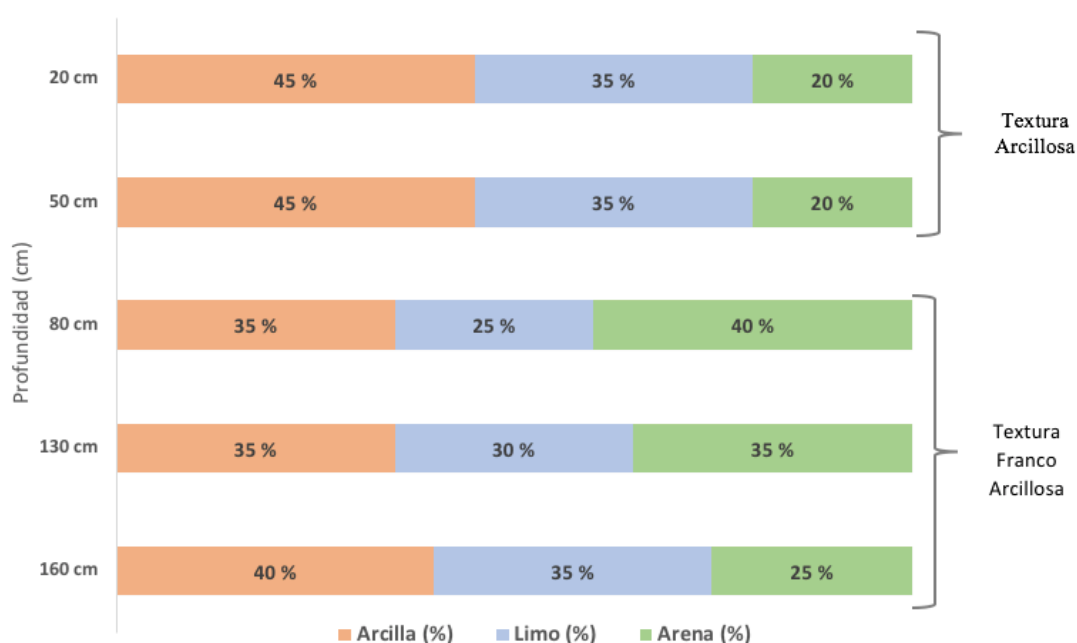


Figura 3: Textura del suelo de la parcela de estudio, a profundidades de 20, 50, 80, 130 y 160 cm

### d) Red de riego de la finca Sinyent

La finca experimental Sinyent está constituida por 20 parcelas que se dividen cada una en 4 subsectores para facilitar la irrigación. La red de distribución fue diseñada para permitir el riego localizado y la fertirrigación de los distintos cultivos en cada subsector de manera independiente y simultánea, según la línea hidráulica a la que estén conectados.

La red de riego de la finca está dividida en 5 líneas hidráulicas que alimentan a varios hidrantes multitoma. Cada línea hidráulica parte del cabezal y dispone de un equipo de abonado independiente instalado en dicho cabezal de riego, lo que permite utilizar diferentes planes de abonado por fertirrigación para cada línea. **(Ver Anejo 1, punto 9)**

La secuencia de funcionamiento de los grupos de bombeo, la apertura de válvulas en campo y la inyección de fertilizantes funcionan de manera totalmente automatizada.

La parcela de estudio representa un único sector, y cuenta con un sistema de riego localizado. Cada fila de árboles es alimentada por 2 tuberías, con 8 emisores por árbol, de un caudal de 2.13 l/h por emisor.

- Cultivo: Caqui “Rojo brillante”.
- Marco de plantación: 5 x 3 m

- Diámetro aéreo medio del caqui: **Da = 1.19 m**
- Conductividad del agua de riego: **CEw = 1,26 mmhos.cm<sup>-1</sup>**
- Conductividad del extracto de saturación del suelo para que se produzca mermas del 100 % en el cultivo: **CE<sub>es</sub> = 8,00 mmhos.cm<sup>-1</sup>**
- Textura del suelo: Franco arcillosa
- Superficie total regable de caqui: **23.000 m<sup>2</sup>**
- Numero de emisores por árbol: **n<sub>e</sub> = 8 emisores por árbol**
- Caudal de los emisores: **q<sub>e</sub> = 2,13 l/h**
- Numero de tuberías por línea: **2**

#### e) Programación del riego actual realizada en la finca Sinyent

La programación del riego en la finca Sinyent se ha realizado hasta ahora a partir de la información climática de la semana anterior, obtenida gracias a la estación meteorológica de Polinyà del Xúquer, situada en la propia finca.

Actualmente, en colaboración con el Instituto de Investigaciones Agrarias IVIA, la asociación de productores AVA-ASAJA se propone instalar y poner en funcionamiento un sistema de programación del riego basado en las medidas de la humedad del suelo, gracias a sondas de humedad. Para, de esta manera realizar una programación del riego dual.

### 3.3. Caracterización de la parcela de estudio

#### a) Generalidades del caqui

El caqui (*Diospyros kaki*.) es un árbol frutal caducifolio originario de China. Es una especie subtropical, pero se adapta bien a zonas templadas de clima mediterráneo. En Europa se ha cultivado tradicionalmente en la cuenca mediterránea, como cultivo menor. El fruto que lleva el mismo nombre es una baya de origen principalmente partenocárpico, de color amarillo-naranja que vira al rojo intenso en su madurez. El caqui tiene la característica de contener una alta concentración en taninos, lo cual le da un sabor astringente. Los taninos se degradan en la madurez del fruto, aunque este se reblandece en el mismo momento. Se consume tradicionalmente en estado de sobre maduración, lo cual dificulta mucho su transporte. El caqui se adapta a una gran gama de terrenos, aunque prefiere los suelos francos y franco arcillosos, con un buen drenaje, un buen nivel de materia orgánica y con pH neutro. También presenta cierta tolerancia a la caliza del suelo. No obstante, el caqui es muy sensible a la salinidad del suelo y del agua de riego. En los suelos de aluviones habituales en las zonas de la ribera, alcanzan un desarrollo muy vigoroso.

El ciclo anual del caqui en un clima mediterráneo comienza en marzo, con el emborde, tras salir de la latencia invernal. Es sensible a las heladas primaverales durante su brotación y floración, las cuales pueden dañar a las yemas, brotes jóvenes, hojas y flores. No obstante, en climas mediterráneos, brota bastante tarde, por lo que las heladas no suelen afectarle. Florece en primavera, en los meses de abril y mayo, donde requiere de buena luminosidad para desarrollarse. El árbol pierde sus hojas en octubre, antes de que maduren los frutos. Para madurar, el fruto requiere un verano largo y cálido, madura y es recolectado de octubre a diciembre. El caqui entra en latencia invernal en el mes de diciembre.

#### b) La variedad caqui “Rojo brillante” y la denominación de origen Caqui Ribera del Xúquer

La variedad de caqui “Rojo brillante”, es una variedad autóctona de la Ribera del Xúquer (Valencia). Tiene una buena productividad y una fruta de buen calibre y buena calidad, sin semillas y poco astringente. La posibilidad de eliminar la astringencia del fruto en post-cosecha permite que el fruto se



mantenga duro, y sea muy fácil de transportar, lo cual ha facilitado mucho su expansión en los mercados europeos.

En 2014, España representaba el 85% de la producción y de la superficie cultivada en Europa <sup>6</sup>. La gran parte de la producción española se encuentra en Andalucía y sobre todo en la comunidad valenciana, donde, hoy en día, se produce el 88% de la producción española (MAPAMA, 2016)<sup>7</sup>. La variedad “Rojo Brillante” representa el 90% de las variedades cultivadas en España. El gran incremento del caqui en Europa, es fundamentalmente debido al aumento de la producción del caqui “Rojo Brillante” en la Ribera Alta de Valencia. Se ha convertido en pocos años en una de la fruta de mayor crecimiento comercial en los mercados europeos.<sup>8</sup>

c) La variedad caqui “Rojo brillante” y la denominación de origen Caqui Ribera del Xúquer

En 1997, se creó la denominación de origen Kaki Ribera del Xúquer, registrada por el Consejo Regulador de la Denominación de Origen Kaki Ribera del Xúquer, que comercializa la marca de caquis Persimon®, con objetivo de garantizar la calidad y la procedencia del caqui “Rojo Brillante”. La marca garantiza que el fruto tenga un color y un calibre definidos, sin astringencia y que provenga únicamente de la zona geográfica formada por 46 municipios de la Comunidad Valenciana, así como que todas las fases de producción se lleven a cabo en la zona definida.

A través de campañas de promoción en el mercado interior y exterior, el CRDO ha conseguido abrir y consolidar nuevos mercados. Los principales mercados de destino del caqui Persimon®, son los alemanes, rusos y demás países del este de Europa, donde el caqui Persimon® ha sido muy bien recibido. Otros mercados son potenciales para el futuro, como Canadá, Brasil y EEUU, y van creciendo año tras año. Por ello, cada año aumenta la cantidad de caquis comercializada por la CDRO kaki, y la superficie cultivada. Hoy en día, casi la mitad de la superficie cultivada de caquis de la Comunidad Valenciana (Ribera Alta y Baja) está inscrita al CRDO.

d) El manejo agronómico del caqui “Rojo brillante”

El caqui es una especie que se adapta bien a la sequía, aunque el déficit hídrico puede limitar la producción y la calidad de la fruta. En climas mediterráneos, como el de Valencia, donde la precipitación anual no suele superar los 500-600 mm, el manejo del riego es seguramente la práctica de cultivo que más influye en la producción y la calidad del fruto.

El manejo del riego también es una herramienta delicada en el cultivo del caqui, ya que es sensible a la humedad excesiva del suelo, y parece adaptarse mucho mejor a suelos con una humedad constante. Siendo los riegos frecuentes muy beneficiosos, suministrando pequeñas cantidades diarias de agua en varios turnos diarios. Según algunos investigadores, el mejor desarrollo y la mayor asimilación de elementos, tiene lugar cuando el agua en el terreno alcanza el 30 % de su capacidad máxima. Lo cual es más cierto aun, cuando el cultivo se realiza en mesetas, y donde la mayor parte de las raíces se encuentran en los primeros 50 cm de suelo. (M. Agustí, 2000)<sup>9</sup>

Al ser muy sensible a la asfixia radical, el caqui exige un suelo bien drenado, y que se eviten aportes excesivos de agua, se recomienda cultivar en mesetas, que ayudan a reducir los efectos de la humedad sobre el sistema radicular.

---

<sup>6</sup> FAOSTAT. FAO Statistic database (Consulta Junio de 2017). <http://www.fao.org>

<sup>7</sup> MAPAMA. Ministerio de la Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (Consulta Junio de 2017). <http://www.mapama.gob.es>

<sup>8</sup> IVIA. Instituto Valenciano de Investigaciones agrarias. *El cultivo del caqui*. Valencia. Llibrerías de la Generalitat. 2015. 340 pg.

<sup>9</sup> AGUSTÍ, M. *Fruticultura*, Mundi-Prensa. Madrid, 2004. 493 pp.

El sistema de riego por goteo permite aplicar cantidades de agua que se aproximen a las necesidades hídricas de la planta, además de fraccionar el riego, y poder aplicar pequeñas cantidades de agua, lo cual es muy beneficioso para el árbol. (M. Agustí, 2000)

e) *El coeficiente de cultivo Kc, del caqui “Rojo brillante” en la Ribera Baja del Júcar*

En 2011, el instituto valenciano de investigaciones agrarias IVIA, ha realizado ensayos sobre varios años para determinar empíricamente los valores de coeficiente de cultivo del caqui “Rojo brillante” en la Ribera Baja de Júcar, para cada mes del año y fase de cultivo.

Estos resultados, se presentan en la tabla 1 y en la figura 4, la información fue obtenida del libro el Cultivo del caqui, 2015, realizado por el IVIA.

Tabla 1: Coeficientes de cultivo experimental obtenidos por el IVIA, para el caqui “Rojo brillante” en la comunidad valenciana. (Fuente: IVIA, “El cultivo del caqui”, 2015)<sup>10</sup>

Mes	Kc Mensual	Kc Semanal	Fase de cultivo
ENERO	0,00	0,00	<b>Latencia</b>
FEBRERO	0,05	0,01	
MARZO	0,26	0,07	<b>Brotación</b>
ABRIL	0,47	0,12	<b>Floración</b>
MAYO	0,62	0,16	
JUNIO	0,76	0,19	<b>Cuajado</b>
JULIO	0,89	0,22	
AGOSTO	0,98	0,25	<b>Crecimiento del fruto</b>
SEPTIEMBRE	1,14	0,29	
OCTUBRE	0,93	0,23	<b>Maduración</b>
NOVIEMBRE	0,56	0,14	<b>Caída de las hojas y Recolección</b>
DICIEMBRE	0,07	0,02	<b>Latencia</b>

Los mayores valores del Kc ocurren en los meses de agosto y septiembre, en esa época, el caqui ha parado su desarrollo vegetativo, y el fruto conoce crecimiento lineal, en esa fase la transpiración de la planta es mayor.

<sup>10</sup> IVIA. Instituto Valenciano de Investigaciones agrarias. *El cultivo del caqui*. Valencia. Llig Llibreries de la Generalitat. 2015. 340 pg.

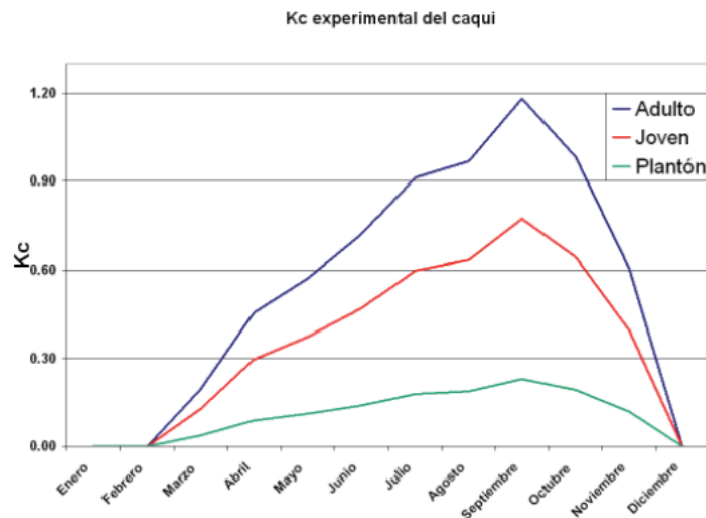


Figura 4: Coeficientes de cultivo experimental obtenidos por el IVIA, para el caqui “Rojo brillante” en la comunidad valenciana. (Fuente: IVIA, “El cultivo del caqui”, 2015)<sup>10</sup>

f) Manejo del cultivo en la parcela de estudio

El cultivo de la explotación es un cultivo de caquis (*Diospyros kakis*) de variedad “Rojo brillante” injertado en pies de (*Diospyros lotus*). Los árboles han sido plantados hace 4 años y están actualmente en su segundo año de producción, el diámetro medio de copa es de 1,19 m.

El cultivo se extiende sobre 2,3 has de superficie y se sitúa en caballones de 1 m de ancho por 20 cm de alto, con un marco de plantación de 5 m x 3 m, siendo la distancia entre arboles de una misma fila de 5 m, y la distancia entre filas de 3 m. Los caballones están acolchados con un agrotexil. Por el efecto de los caballones, y del riego localizado, la gran mayoría de las raíces activas se sitúan en los primeros 50 cm de profundidad.

- Variedad: *Diospyros Caqui* var. Rojo brillante
- Porta-injerto: *Diopyros lotus*
- Edad de la plantación: 4 años
- Superficie: 2,3 ha
- Dimensiones del caballón: 1 m x 20 cm
- Marco de plantación: 5 m x 3 m

## 4. TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La programación del riego es una técnica de decisión que permite, utilizando una o varias metodologías, determinar la dosis de riego y el momento de aplicación, para adecuar el riego a las necesidades hídricas de la planta y así evitar los riegos excesivos o deficitarios, que pueden afectar negativamente al cultivo y su producción. La programación del riego busca conocer la dosis y la frecuencia de riego adecuados en cada fase del cultivo y/o momento del año. Una programación del riego adecuada puede ayudar a lograr varios objetivos simultáneamente, como el ahorro de agua, energía y mano de obra, así como maximizar el rendimiento y la rentabilidad.

Los métodos de programación del riego se clasifican en tres categorías según el origen de la información utilizada.

- a) El método del balance hídrico del conjunto suelo-planta-atmósfera, basada en la información climática de la zona de estudio.
- b) El método del estado hídrico de la planta, basada en las medidas directas en las plantas de la parcela de estudio.
- c) El método del contenido de hídrico del suelo, basada en las medidas directas de la humedad del suelo en parcela de estudio.

Cada una de las metodologías propician de unas tecnologías necesarias para su aplicación en campo de manera fiable y robusta.

La programación del riego que se realiza en la parcela de estudio se basa en los datos climáticos obtenidos gracias a una estación meteorológica situada en la propia finca, la estación de Polinyà del Xúquer. Actualmente, se está instalando un sistema basado en las medidas de la humedad con sondas EnviroScan de Sentek, para reforzar la programación con una programación dual y realizar experimento de Kc y controlar estrés hídrico.

### 4.1. La programación del riego basado en el balance del agua y en los parámetros climáticos

La primera metodología se basa en la determinación de los aportes hídricos necesarios para satisfacer las necesidades del cultivo, según el balance hídrico del conjunto suelo-planta-atmósfera. Con este método se estima que la evapotranspiración del cultivo ETc, es el cociente entre la evapotranspiración de referencia ET0 y un coeficiente de cultivo Kc, siendo:

$$ETc \text{ (mm/día)} = ET0 \text{ (mm/día)} * Kc$$

La evapotranspiración de referencia ET0, representa la demanda evapotranspirativa de la atmósfera en las condiciones microclimáticas de la zona de estudio. Y se determina gracias a ecuaciones matemáticas a partir de variables microclimáticas de la zona, pluviometría, la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, o la combinación entre ellos. En este trabajo se utiliza este Penman-Monteith-FAO (1998) al ser recomendado por la FAO para la programación del riego, y el más aceptado en la zona de estudio.<sup>11</sup>

El coeficiente de cultivo Kc, representa la capacidad del suelo y del cultivo para atender a demanda evapotranspirativa de la atmósfera. Depende de numerosos factores como que diferencian a un cultivo de una pradera, la altura del cultivo, su resistencia y el albedo sobre la superficie del suelo, además de

---

<sup>11</sup> ALLEN, G. R., PEREIRA, L., RAES, D., *et al.* Estudio FAO Riego y drenaje 56. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos.* Roma, Italia. FAO, 2006.

otros factores como el manejo del cultivo, su estado de desarrollo y el tipo de suelo entre otros. Los valores de Kc en un cultivo caduco como el caqui alcanzan valores máximos cuando la cubierta vegetal es máxima y mínimos hacia la senescencia foliar. Su determinación se puede realizar de manera teórica a partir de información sobre la zona de estudio y unos valores previamente determinados empíricamente para una serie de cultivos en condiciones diferentes en el libro 56 de la FAO. No obstante, los resultados obtenidos mediante este procedimiento suelen ser muy aproximativos para cultivos poco conocidos y en condiciones alejadas de las condiciones iniciales. Por lo que en este trabajo se usan los datos de Kc, determinados empíricamente por el IVIA para el cultivo del caqui “Rojo Brillante” en la Ribera de Xúquer.<sup>12</sup>

Tras la determinación de la ETc, se calcula el balance del agua en el suelo según las pérdidas por evapotranspiración del cultivo y los aportes por precipitación efectiva. Se estiman las necesidades netas y totales necesarias al cultivo aplicando una serie de coeficientes para adecuar las necesidades a la realidad. Los coeficientes aplicados se relacionan por el efecto del riego localizado, y con las pérdidas de agua por percolación y uso de aguas salinas. Se determinan dosis de riego y tiempo de riego según la capacidad de la instalación de riego a aportar las necesidades hídricas totales necesarias. **(Ver Anejo 6)**

#### *a) Tecnología necesaria para su aplicación*

Para realizar una programación semanal del riego fiable, el método es muy exigente en información agroclimática de la zona, siendo el método más preciso y acertado cuando más información se disponga. La información climática se obtiene gracias a estaciones agroclimáticas dotadas de sensores de temperatura, radiación, humedad, velocidad del viento y pluviometría.

#### *b) Ventajas e inconvenientes del uso de esta metodología*

Hoy en día, se trata de la metodología más ampliamente y conocida para la programación del riego. Ha sido la ampliamente estudiada y transmitida por los centros de investigación agronómico y goza de una bibliografía muy completa.

Además de tener varias aplicaciones, pudiendo usarse para la determinación de las necesidades medias de un cultivo durante varios años para la instalación de sistemas de regadío.

Las condiciones climáticas pueden ser muy variables año a año, por lo tanto, para la programación de riego se prefiere un cálculo semanal, a partir de los datos climáticos de la semana anterior.

Para aplicarse con fiabilidad, el método exige la existencia de una estación agroclimática a proximidad de la parcela, para poder alimentar el método de cálculo con información pertinente.

La determinación del coeficiente de cultivo Kc mediante cálculos resulta ser demasiado aproximativa si las condiciones de aplicación y el cultivo se alejan de las condiciones de cálculo iniciales. Siendo necesario determinarlo de manera empírica para un cultivo y una zona de aplicación. Esa determinación precisa de experimentos de varios años llevados por un centro de investigación, lo cual limita mucho su extensión. Ese caso es particularmente cierto en cultivos novedosos como lo es el caqui “Rojo Brillante” en la provincia de Valencia, donde tradicionalmente se usaban los valores de Kc conocidos de los cítricos. Fue necesario que el centro de investigación agrario de Valencia realice experimentos para los valores reales en la zona.

---

<sup>12</sup> ALLEN, G. R., PEREIRA, L., RAES, D., *et al.* Estudio FAO Riego y drenaje 56. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO, 2006.*

Otro factor limitante de esta metodología es la alta carga de cálculos que precisa, siendo posibles errores de cálculo, además de no permitir conocer la dosis, ni el fraccionamiento óptimo de riego a aplicar en cada momento, sino una estimación en el momento del cálculo.

#### 4.2. La programación del riego basado en las medidas del estado hídrico de la planta

La metodología de la programación del riego a partir de medidas del estado hídrico del cultivo se basa en mediciones directas de las pérdidas de agua por transpiración de una o un grupo de plantas que forman parte del cultivo. Se trata del método más preciso para la programación del riego, pero también el más complicado y costoso de aplicar. Por esta razón, esta metodología suele ser usada esencialmente en investigación y no en explotaciones comerciales. Existen varias técnicas para medir el estrés hídrico en una planta que difieren en su fundamento, en la tecnología utilizada y en la manera de poner en aplicación. Hoy en día, las técnicas más democratizadas son las medidas de las microvariaciones del tallo (dendrómetro), la medida del flujo de savia, la medida del potencial hídrico foliar y la medida de la temperatura del dosel vegetal. **(Ver Anejo 3, punto 5)**

De forma general, los métodos de programación del riego basados en las medidas del estado hídrico de la planta presentan dificultades de interpretación de los resultados, siendo necesarios ensayo de calibración para poner en relación las medidas tomadas y el riego aportado.<sup>13</sup>

#### 4.3. La programación del riego basado en las medidas de la humedad del suelo

La programación del riego basado en la medida de la humedad del suelo busca adecuar los aportes hídricos según la dinámica del contenido hídrico del suelo según la profundidad de medida, determinada gracias a un sensor de humedad.

El agua disponible para un cultivo se determina principalmente a partir de dos variables medibles ligadas al contenido hídrico del suelo, la tensión hídrica del suelo y la constante dieléctrica del suelo, cada forma exige de una tecnología específica. Mientras que la primera variable nos indica la cantidad de agua disponible para la planta, la segunda variable nos indica el volumen hídrico presente en el suelo.

Hoy en día, existen tecnologías que permiten una lectura continua y una monitorización de la humedad del suelo en tiempo real, lo cual facilita el uso de esta metodología para la programación semanal del riego.

Esta metodología de programación del riego presenta varias ventajas con respecto a las otras metodologías, las tecnologías existentes para la medición de la humedad del suelo permiten una lectura continua y una monitorización del contenido hídrico del suelo. Siendo posible mantener la humedad del suelo cercano a las raíces absorbentes, dentro de un rango óptimo para la planta y la producción, realizando los aportes hídricos necesarios en cada fase de cultivo y época del año sin necesidad de cálculos adicionales.

Las sondas de humedad pueden instalarse de manera permanente en ubicaciones estratégicas del campo monitorizando la humedad continuamente suministrando información para el manejo del riego.

##### *a) Medición del potencial hídrico del suelo*

El método tensiométrico mide el potencial matricó del suelo, el cual incluye las fuerzas de tensión ejercida por los capilares del suelo y el potencial gravitacional del suelo. La suma del potencial matricó

---

<sup>13</sup> MARTÍN DE SANTA OLALLA MAÑAS, Francisco, LÓPEZ FUESTER, Prudencio, et CALERA BELMONTE, Alfonso. *Agua y agronomía*. 2005.

y gravitacional es la fuerza principal para los movimientos del agua en el suelo. Se trata de un método muy preciso que indica la parte de agua en el suelo que la planta es capaz de absorber.

Existe una gran gama de tecnologías para la medición del potencial hídrico, la gran mayoría se basa en el principio del medio poroso. Los instrumentos constan de una parte hecha de un material poroso que permite el libre intercambio entre el agua del suelo y del material poroso, cuando el suelo se seca, el agua se mueve desde los poros del instrumento hacia los poros del suelo, e inversamente en caso del humedecimiento del suelo. Los principales instrumentos son los tensiómetros y los bloques de yeso.<sup>14</sup>

**El tensiómetro** consiste en una capsula de material poroso, normalmente cerámico, permeable al agua, y conectada a un manómetro por medio de un tubo, con todas las partes del sistema llenas de agua. Al estar en contacto con el suelo, la capsula porosa, hace de intercambiador de agua a través de los poros de su superficie. Cuando se alcanza el equilibrio hidráulico entre el suelo y el tubo, la presión dentro del tubo del tensiómetro es igual a la tensión del suelo, y el con el manómetro se puede determinar el potencial hídrico del suelo.

**El bloque de yeso** es una tecnología que se basa en la medición de la resistencia eléctrica entre dos electrodos situados en el interior de un bloque de yeso enterrado en el suelo. El bloque de yeso es un material poroso por lo que su nivel de humedecimiento es proporcional a la humedad del suelo. Cuando el bloque es húmedo es más conductor, por lo que la resistencia es menor, e inversamente en caso de una desecación del suelo. Un medidor registra los valores de resistencia de los bloques. Este método es indirecto, por lo que precisa de una calibración para relacionar la resistencia eléctrica del bloque de yeso y el agua útil del suelo.

La principal tecnología utilizada para la lectura de la humedad del suelo son los sensores Watermark®, los cuales han sido muy utilizados tradicionalmente para la monitorización de la humedad del suelo, en parte por su accesibilidad, aunque actualmente con la aparición de tecnologías de mayor facilidad de interpretación se ha ido reduciendo su uso.

Los métodos basados en el potencial hídrico tienen la ventaja de ser más económicos y accesibles que otras tecnologías, además de medir la variable más importante de la humedad del suelo, la parte de agua aprovechable por la planta y ser precisos (mas cierto en el caso de los tensiómetros). No obstante, presentan dificultades de interpretación y una alta exigencia en calibración entre la planta, el suelo y el instrumento, para realmente relacionar las medidas con la capacidad de absorción de las plantas

Los equipos de medición del potencial hídrico tienen la capacidad de realizar lecturas continuas grabables en un datalogger y así monitorizar el suelo, y facilitar la programación del riego manteniendo la tensión del suelo en un rango adecuado para que la planta no sufra estrés y se desarrolle óptimamente. No obstante, cada variedad y cada suelo tiene una repuesta diferente a la tensión del suelo. Son necesarias pruebas y ensayos para determinar el volumen de agua que es necesario aportar para mantener la tensión del suelo en el rango deseado. Además, las tecnologías tensiometricas presentan otras limitaciones como el tiempo de respuesta lento, la fragilidad y la necesidad de mantenimiento de los equipos.

#### *b) Medición del contenido volumétrico del agua en el suelo (Constante dieléctrica)*

Los métodos dieléctricos buscan estimar el contenido hídrico del suelo basándose la medida de la constante dieléctrica del suelo.

---

<sup>14</sup> Muñoz-Carpena R. *Field Devices For Monitoring Soil Water Content*. BUL343. Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension. University of Florida. 2015

La constante dieléctrica de un material representa su capacidad a transmitir ondas o pulsos electromagnéticos. En un medio compuesto como el suelo, el valor de la constante dieléctrica es una contribución de todos los elementos que lo componen. La constante dieléctrica del agua es mucho mayor ( $K_a = 81$ ) que la de los componentes sólidos del suelo ( $K_a = 2-5$ ) o del aire ( $K_a = 1$ ). Por lo que pequeñas variaciones en el contenido volumétrico hídrico tienen efectos importantes en la constante dieléctrica del suelo. Se puede asumir que la constante dieléctrica del suelo depende principalmente del contenido hídrico del suelo.

Las tecnologías basadas en la medida del contenido volumétrico se han ido utilizando cada vez más en la monitorización del suelo por varias ventajas que ofrecen frente a la tecnología de medida del potencial hídrico. Las principales razones son su tiempo de respuesta casi instantáneo y la aparición en el mercado de equipos más baratos y diversificados. Y, por lo tanto, la disponibilidad y variedad de tecnologías anejas, como los datalogger y programas informáticos de análisis compatibles con esas tecnologías.

Hoy en día, la mayoría de las tecnologías para la medición de la constante dieléctrica del suelo, se basan en el principio de la reflectometría. La reflectometría es un método de análisis no destructivo que consiste en la capacidad de una señal a ser reflejada al encontrarse con una discontinuidad en el medio. Funciona emitiendo una señal en el suelo, la cual se propagará, hasta encontrarse con una discontinuidad (impedancia), y parte de su energía será devuelta al punto de inyección. El análisis de la señal reflejada permite inferir la información sobre el medio analizado.

Las diferentes tecnologías de reflectometría existentes se diferencian por el tipo de onda emitida y el análisis de la señal reflejada. Funcionan con una calibración empírica entre el contenido volumétrico hídrico del suelo y una señal emitida por la sonda, que puede ser de diferente tipo (tiempo, frecuencia, impedancia o fase de onda).

Actualmente, la tecnología mayormente desarrollada y utilizada para la medición del contenido hídrico del suelo es la Reflectometría del Dominio de la Frecuencia, **FDR**. Donde el análisis de la señal se enfoca a los cambios de frecuencia entre la señal emitida y la reflejada.

Los métodos volumétricos permiten conocer la cantidad de agua presente en el suelo, pero no permiten conocer la tensión de agua, la dificultad de extracción del agua por las plantas, y por tanto su disponibilidad.

El sensor FDR, funciona formando un condensador con el suelo, mediante dos electrodos y el suelo como material resistente. Mediante un circuito oscilante, un campo electromagnético es aplicado entre los dos electrodos. La frecuencia de este campo depende de la resistencia de la constante dieléctrica del suelo, los cambios de resistencia del suelo son entonces esencialmente debido a cambios de humedad, y forman impedancias en el suelo que reflejan la señal enviada, cambiando su frecuencia. El sensor mide entonces el cambio de frecuencia experimentado y mediante una ecuación de calibración, se relaciona la escala de frecuencia con el contenido hídrico del suelo.<sup>15</sup> **(Ver Anejo 3, punto 6.3)**

---

<sup>15</sup> . Charlesworth. *Soil water monitoring an information package*. Land & Water Australia. Canberra. 2005. 96 pg.



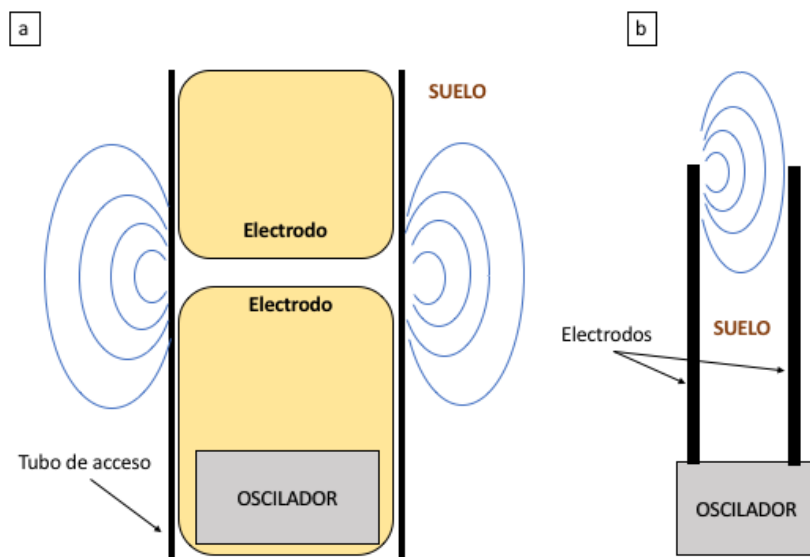


Figura 5: Configuraciones de sondas de humedad con tecnología FDR

Existen distintas configuraciones de sondas de capacitancia que difieren en su instalación, la primera son sensores cilíndricos insertado en un tubo de PVC enterrado en el suelo, el campo electromagnético se propaga por el tubo de acceso y las diferencias de frecuencia se analizan entre los dos electrodos cilíndricos (**Figura 5.a**). Esta es la configuración de las sondas fabricadas por la empresa australiana Sentek®. La sonda puede ser inamovible del tubo de acceso, mantenerse en el suelo y monitorizar el suelo. O amovible de manera a medir varios puntos con una misma sonda, aunque no permite la monitorización continua. Estos sensores tienen la capacidad de medir la humedad del suelo en un radio reducido de hasta 10 cm, aunque el 95% de las medidas representan los primeros 5 cm. Esta configuración presenta cierta ventaja como la posibilidad de acoplar varios sensores en una misma sonda de manera a medir la humedad del suelo a varias profundidades de manera simultánea. También presenta la capacidad de acoger varios tipos de sensores en una misma sonda, como sensores de salinidad y temperatura, permitiendo obtener lecturas de varios factores simultáneamente.

En la segunda configuración, los electrodos se presentan como dos varillas que se clavan en el suelo, el campo electromagnético se propaga de una varilla a otra, y se analiza únicamente la parte de suelo situada entre las dos varillas (**Figura 5.b**). Son modelos más económicos, no obstante, para medir a diferente profundidad simultáneamente, se tienen que instalar varias sondas simples.

Las sondas de capacitancia presentan la ventaja de la facilidad de instalación, de uso y de interpretación de los resultados, dando valores de salida en porcentaje de m<sup>3</sup> de agua respecto a m<sup>3</sup> suelo tras la calibración.

No obstante, las sondas de capacitancia tienen un volumen de lectura muy reducido, explorando simplemente los 5 cm de suelo que rodean las sondas. Lo cual resulta en una gran sensibilidad a los defectos del suelo durante la instalación, como burbujas de aire, piedras y raíces entre otros y exigen un contacto íntimo entre el sensor (o el tubo de acceso) y el suelo. También son instrumentos especialmente sensibles a las altas temperaturas y a la insolación, lo cual limita su situación en campo. Los sensores exigen una calibración, aunque suele ser más simple que con otras tecnologías.

También cabe destacar el hecho de que estos instrumentos miden el contenido hídrico del suelo y no exactamente el agua aprovechable por la planta a contrario de los métodos de medida del potencial hídrico del suelo.

#### 4.4. Elección de la tecnología para el caso de estudio

Para el caso de estudio, se quiere utilizar una solución tecnológica capaz de realizar una lectura continua de la humedad del suelo, para programar el riego semanalmente y controlar los distintos experimentos de estrés hídrico en curso en la parcela. La tecnología FDR es actualmente la mas desarrollada por las casas comerciales, y por lo tanto la mas accesible y adecuada para lograr estos objetivos.

Para este estudio se ha elegido la solución tecnológica EnviroScan® de la marca australiana Sentek®, al ser la tecnología normalmente utilizado por el IVIA en sus experimentos sobre el control del riego. El uso de las sondas de humedad de la marca Sentek® esta en expansión durante los últimos años, tanto en explotaciones comerciales como en los centros de investigaciones agrarias.

Las sondas de humedad de la marca Sentek® presentan algunas dificultades en cuanto a accesibilidad económica<sup>16</sup>, lo cual no suele ser un problema en grandes explotaciones comerciales. No obstante, la estructura productiva de la Ribera Baja de Júcar se caracteriza por un alto nivel de minifundismo. Por esta razón, en este estudio, se quiere elegir una solución tecnológica adicional mas económica. Además, la sonda EnviroScan® presenta una configuración anillada, se cree conveniente elegir una sonda de configuración simple de manera comparativa.

La solución tecnológica económica elegida, es la propuesta por la casa comercial Decagon Devices®, que propone una gama de tecnologías compatibles entre si para la medición de la humedad del suelo, Ech2o System®. Se ha elegido para este estudio, la sonda simple 10HS, la cual es capaz de analizar un volumen de suelo superior a las demás sondas propuestas por la marca. Se ha elegido la casa comercial Decagon Devices® por la confianza adquirida por la UPV, que ha utilizado sus tecnologías en experimentos previo con resultados satisfactorios.

---

<sup>16</sup> La empresa Sentek® colabora en Europa con un vendedor único por país, en España el vendedor es la empresa Puech & Asociados situada en Sevilla (<http://www.puechasociados.es>). En Francia el vendedor es la empresa Agralis situada en Agen (<https://www.agralis-services.fr>).

## 5. SOLUCIONES PLANTEADAS

Este estudio se basa en un experimento del IVIA en colaboración con la UPV y la asociación de productores AVA-ASAJA, para la observación de comportamiento de un cultivo de caqui “Rojo brillante sometido a varias condiciones. La aplicación de varias dosis de riego, el 75% y el 100% de las necesidades hídricas del cultivo, y la presencia o no de malla de agrotexil negro. Para el control del experimento y la programación del riego en la parcela se han instalado sondas de humedad de tipo EnviroScan® y 10HS en la parcela.

Un total de 8 sondas de humedad fueron instaladas en la parcela, 4 sondas de humedad EnviroScan® y 4 sondas de humedad 10HS. Las sondas se instalaron dos a dos de manera a servir de repetición, en cada condición. **(Ver Plano 4 – Situación de las sondas de humedad en la parcela).**

Dos sondas de humedad EnviroScan® se sitúan en un caballón recubierto por una malla negra de agro textil. Y las otras dos se sitúan en caballón de suelo desnudo. Las 4 sondas se sitúan en una zona regada con el 100 % de las necesidades del cultivo.

Dos sondas de humedad 10HS se sitúan en un caballón recubierto por una malla negra de agro textil. Y las otras dos se sitúan en caballón de suelo desnudo. Las 4 sondas se sitúan en una zona regada con el 100 % de las necesidades del cultivo.

En este estudio se consideran las dos sondas EnviroScan® y las dos sondas 10HS en suelo desnudo y a 100 % de las necesidades hídricas del cultivo.

### 5.1. Primera solución: la sonda de humedad EnviroScan® de Sentek®

La sonda EnviroScan® forma parte de una solución tecnología propuesta por la empresa australiana Sentek® para la medición y la monitorización de la humedad del suelo (**Figura 6**). El equipo está formado por una sonda de capacitancia (**Figura 7.a**) y una unidad de adquisición de datos y de comunicación GPRS/3G (**Figura 7.b**), que envía los datos a un servidor FTP, para su posterior análisis e interpretación. Para la representación gráfica de los datos y el análisis de los mismos se puede utilizar el programa informático Irrimax® proporcionado por la propia empresa Sentek®.

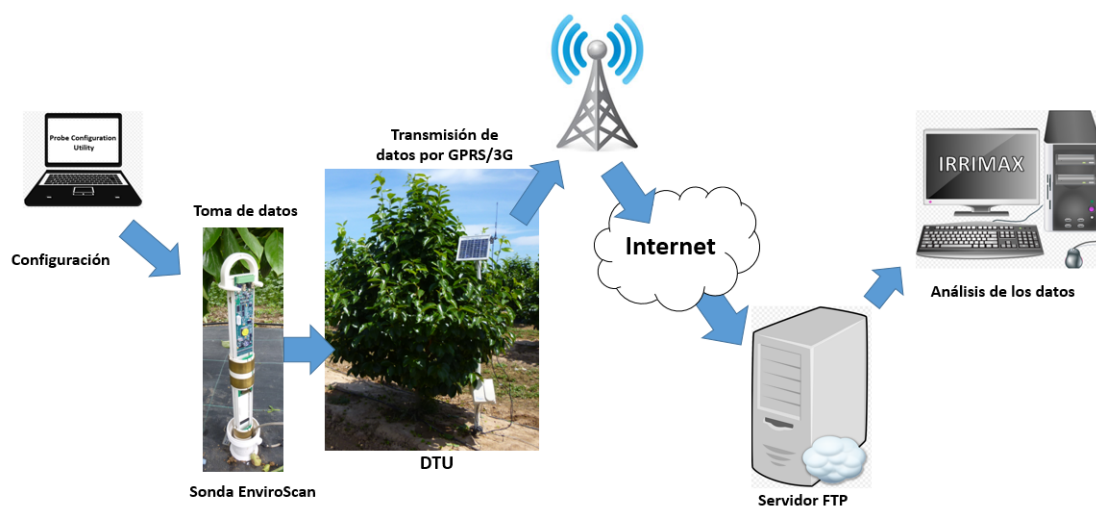


Figura 6: Solución tecnológica EnviroScan® de Sentek®

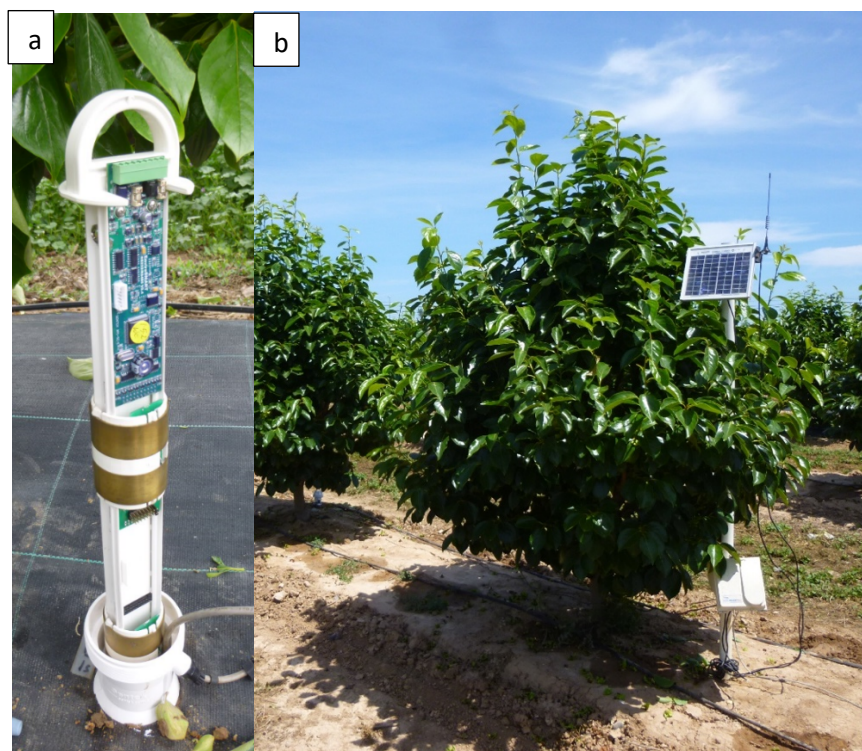


Figura 7: Solución tecnológica EnviroScan® de Sentek®. Instalación en campo

La sonda EnviroScan se instala en campo a través de un tubo de acceso que evita que los sensores estén en contacto directo con el suelo y que mejora la precisión de las medidas. El tubo se sella para poder mantenerse en el campo y monitorizar de forma continua la humedad del suelo. **(Figura 7.b)**

La sonda se instala en campo junto a una unidad de adquisición y de transmisión de datos (DTU) colocada junto con una antena y una placa solar. La DTU comunica con la sonda y transmite las medidas a un servidor FTP vía 3G o GPRS.

Los datos se recuperan desde un servidor FTP y el análisis de los datos se realiza con el programa Irrimax® de Sentek® que permite interpretar mediante un análisis gráfico las lecturas de la sonda.

*a) Configuración de la sonda EnviroScan® de Sentek®*

Con anterioridad a ser instalada en campo la sonda EnviroScan® necesita ser ensamblada ensamblarse **(Ver Anejo 4, punto 3.1)**, calibrar y configurada junto con la unidad de adquisición y transmisión de datos (DTU). **(Ver Anejo 4, punto 3.2)** La configuración permite registrar la profundidad de los sensores, la frecuencia de muestreo y la dirección del servidor FTP, para la comunicación directa entre el servidor y la unidad de comunicación vía GPSR/3G.

La configuración de la sonda y de la DTU y la calibración de la sonda se realizan mediante una aplicación para Windows llamada “Probe Configuration Utility (PConfig)”. **(Ver Anejo 4, punto 4)**

La sonda EnviroScan® esta previamente calibrada para una serie de suelos característicos, no obstante, para su correcto funcionamiento es necesario una calibración para relacionar la escala de frecuencias de lectura de la sonda con el contenido hídrico del suelo en porcentaje de humedad. Para ello se realiza una calibración en seco (humedad = 0%) y en saturado (humedad = 100 %). La calibración en seco se realiza exponiendo la sonda dentro del tubo de acceso al aire libre, y la calibración en medio saturado se realiza con un recipiente normalizado lleno de agua. Este recipiente permite rodear de agua al tubo de acceso y a la sonda, para que se encuentren en un medio saturado de humedad sin dañar la sonda. **(Ver Anejo 4, punto 4.2.2)**

*b) Situación y emplazamiento de la sonda EnviroScan® en campo*

- **Situación de la sonda en la parcela (Macro entorno):** La situación óptima de la sonda en una parcela depende principalmente de la homogeneidad de los factores que influyen sobre la humedad del suelo. Entre los factores pueden que pueden afecta a la homogeneidad de las lecturas destacan, el sistema de riego, su sectorización y la homogeneidad de aplicación, el cultivo y la variedad, la edad de los árboles, el tipo de suelo y la pendiente del terreno.

Normalmente, una única sonda de humedad es suficiente para caracterizar la humedad del suelo de una parcela de un suelo llano y homogéneo, con un mismo cultivo y sector de riego. En caso de variación en alguno de los factores, principalmente la cota de la parcela o del tipo de suelo, la sonda se debería instalar en una zona representativa de más del 50 % de la parcela.

- **Emplazamiento de la sonda en la parcela (Micro entorno):** La sonda EnviroScan® de Sentek® debe posicionarse en un árbol característico del cultivo, de tamaño de copa y de perímetro de tronco próximo al promedio de los arboles que se pretende regar. Además, tampoco debe ser un árbol guarda (en margen del cultivo).

Se coloca la sonda dentro del bulbo húmedo en posición norte respecto del árbol. Este último punto es especialmente importante en sensores FDR y en cultivos caducos como el caqui. Los sensores FRD son particularmente sensible a las altas temperaturas y a la incidencia solar, y pueden interpretar como variaciones de humedad del suelo, lo que realmente son variaciones de temperatura. La posición norte aporta un mayor sombreado, y una menor temperatura incidente sobre el sensor y la zona que mide, lo que redundará en la estabilidad de la medida.

Dentro del bulbo húmedo, la sonda se posiciona a una distancia aproximada de 1 m del pie del árbol para contemplar las características del suelo a las cuales están sometidas el promedio de las raíces.

*c) Instalación de la sonda EnviroScan® en campo*

Para instalar la sonda EnviroScan® de Sentek®, es necesario enterrar un tubo de acceso de PVC, de manera que este en contacto íntimo con el suelo y que además, destruya lo menos posible la estructura del suelo. **(Ver Plano 5 – Instalación de la sonda EnviroScan® en la parcela).**

Las etapas de la instalación de la sonda en campo son las siguientes:

1. **Enterrar el tubo de acceso de PVC:** El tubo de acceso se entierra de manera que altere lo menos posible la estructura del suelo. El método consiste en cavar un agujero con una barrena, de menor circunferencia que la del tubo e insertar el tubo de acceso empleando un mazo. **(Ver Anejo 4, punto 6.1.2 a)**
2. **Sellado del tubo de acceso enterrado:** El sellado del tubo de acceso tiene la función de proteger la sonda de alteraciones. Se sellan cada extremidad del tubo de acceso con un tapón sellador específico. **(Ver Anejo 4, punto 6.1.2 b)**
3. **Instalación de la unidad de adquisición y de comunicación de los datos:** La unidad DTU se instala acoplándose a un poste, al cual se fijan una placa solar y una antena. Se instala el equipo de comunicación lo más cercano posible a un árbol, para protegerlo de la vista y del viento. **(Ver Anejo 4, punto 6.2)**
4. **Instalación y conexión de la sonda:** Tras limpiar el interior del tubo de acceso posiciona la sonda EnviroScan® en dicho tubo. Se conectan la sonda y la DTU y al ordenador. **(Ver Anejo 4, punto 6.3 y 6.4)**

5. **Verificación del correcto funcionamiento del equipo:** Se verifica la correcta configuración de equipo y se ejecuta un test con el programa “PConfig”. **(Ver Anejo 4, punto 6.5)**
6. **Detección de fallos en la instalación de la sonda:** Tras la instalación es posible detectar fallos debidos a una instalación deficiente durante las primeras interpretaciones de los datos. Estos fallos tienen un efecto característico en la representación gráfica de las lecturas de la sonda. **(Ver Anejo 4, punto 7)**

d) Interpretación de las lecturas de la sonda EnviroScan® de Sentek®

Las lecturas de la sonda se obtienen directamente desde el servidor FTP designado en la configuración del equipo.

Las sondas EnviroScan® dan una gran cantidad de información sobre la dinámica del agua en el suelo a distintas profundidades, lo cual permite determinar el perfil del suelo y establecer líneas de gestión del riego, que permiten realizar una programación del riego.

Para interpretar estos datos, se utiliza el programa Irrimax® 10 de Sentek®. Tras la creación de la base de datos **(Ver Anejo 7, punto 2.1)**, el programa permite representar gráficamente los resultados.

La interpretación de los datos con Irrimax® se realiza de manera gráfica, a partir de distintos tipos de gráficos según los datos explorados. Los dos gráficos principales son el gráfico sumatorio **(Figura 8.a)**, representa la suma de los valores de los 3 primeros sensores de la sonda (situados a 10, 30 y 50 cm respectivamente). Este gráfico permite observar de manera general la dinámica del agua en el suelo. Los aportes por lluvia y riego y las pérdidas por transpiración de la planta y por gravedad. **Con este gráfico, una vez estipuladas las líneas de gestión, se determina la frecuencia de riego de manera a mantener la humedad del suelo en los límites deseados.**

El gráfico apilado **(Figura 8.b)** representa los valores de los 4 sensores por separado de manera simultánea. Los 3 primeros sensores, permiten observa la dinámica del agua en el suelo y la actividad radicular de las plantas a distintas profundidades, de manera a evaluar la zona de máxima actividad radicular. **Con este grafico se determina el tiempo de riego, de manera a abastecer la zona de máxima actividad radicular, sin provocar pérdidas profundas.** El último sensor, situado a 70 cm (en una zona de escasa actividad radicular), tiene una función de monitoreo en el tiempo, permitiendo evaluar las pérdidas de agua por percolación profunda.

Los graficos se analizan con varias herramientas que permiten la observacion de la informacion relevante que proporcionan. **(Ver Anejo 7, punto 2.2)**

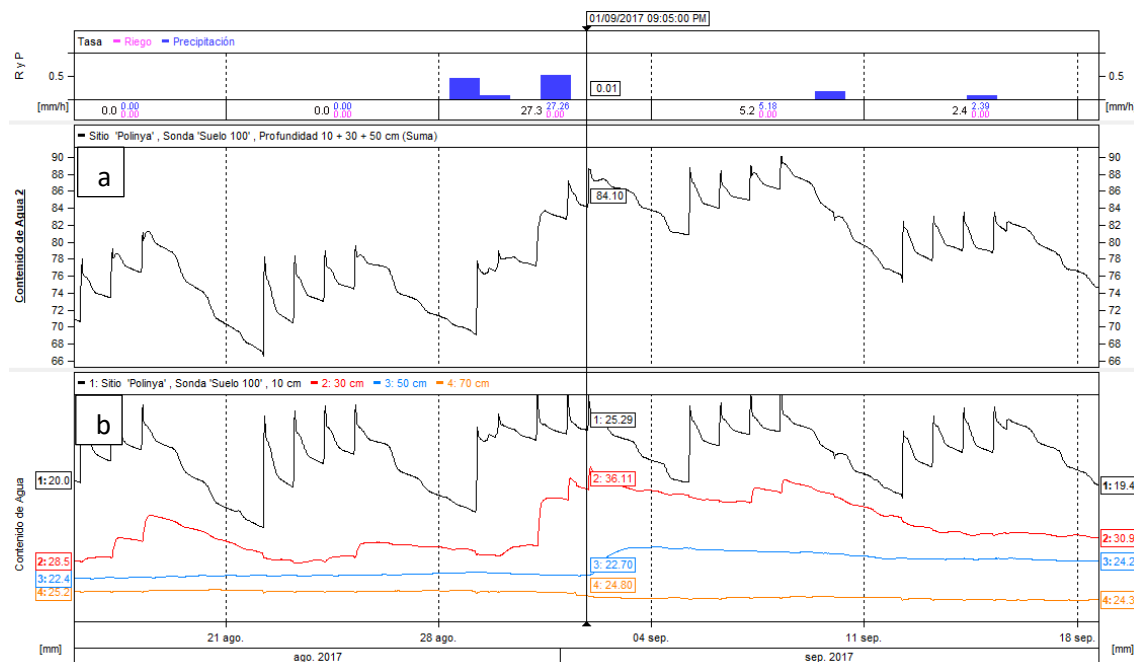


Figura 8: Representación grafica de las lecturas de la sonda EnviroScan® con el programa Irrimax® 10

De forma general, la interpretación de las lecturas de la sonda EnviroScan® con Irrimax® 10 es la siguiente. Tras un riego o una lluvia abundante que provoca un exceso de agua en el suelo y la procedente saturación del suelo. Las pérdidas son entonces únicamente debidas a la gravedad, hasta que se estabilice el nivel de humedad en el suelo (se observa generalmente a los 3 días) (**Figura 9.a**). El nivel estabilizado de humedad es la capacidad de campo del suelo, no hay perdidas profundas de agua y la humedad se mantiene constante.

La absorción de agua por parte de las raíces de las plantas aparece de forma muy característica en las lecturas de las sondas (**Figura 9.b**) en forma de peldaños. Esta característica es debida a la transpiración y la absorción de agua por las raíces de las plantas durante el día y la ausencia transpiración y de absorción durante la noche. Esa información es crucial para saber si se satisfacen las necesidades hídricas de un cultivo y para determinar las tasas de absorción según los riegos en cada momento.

Cuando la humedad del suelo disminuye, se observa que los peldaños so cada vez más pequeños, por lo que la absorción disminuye hasta ser mínima (**Figura 9.c**). Este fenómeno es debido a la falta de humedad del suelo, y a la tensión creciente que dificulta la absorción de agua de las raíces. El nivel en el cual ocurre ese cambio se denomina punto de marchitamiento, y se busca mantener la humedad del suelo por encima de su nivel.



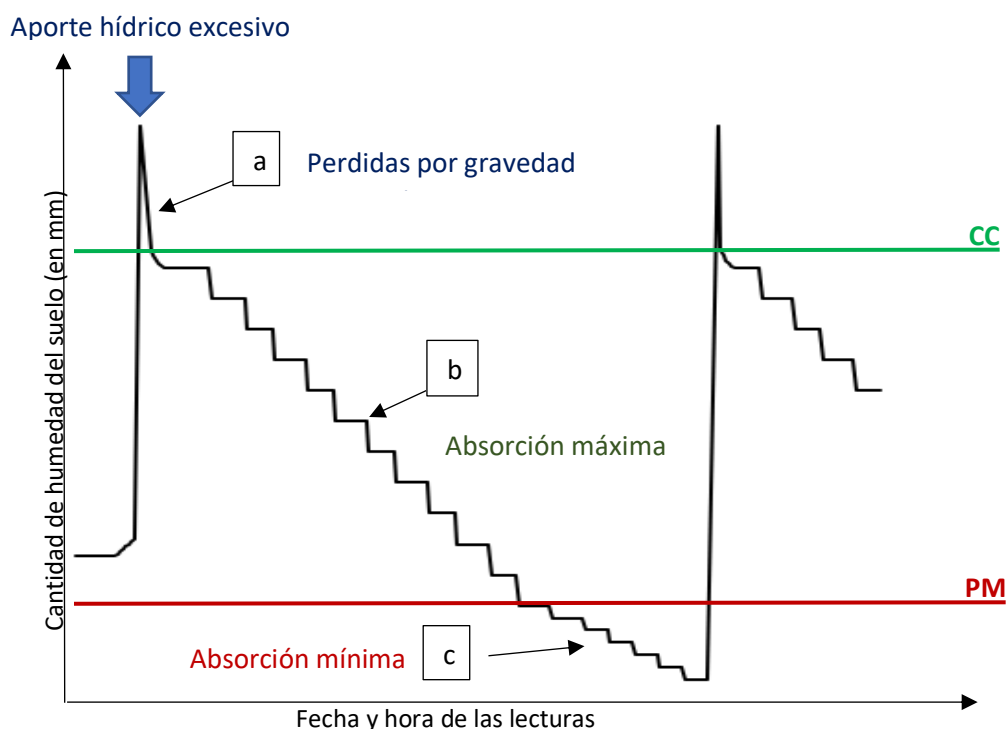


Figura 9: Esquema de la interpretación gráfica de las lecturas de las sondas EnviroScan®.

## I. Determinación de las líneas gestión con Irrimax® 10

La interpretación de las lecturas de las sondas de humedad se enfoca hacia la determinación de la frecuencia, la dosis de riego y el momento de aplicación óptimo para satisfacer las necesidades hídricas de la planta, sin que ocurran pérdidas. Para ello, se determinan unas líneas de gestión que se definen como indicadores de referencia y son representadas como líneas horizontales y paralelas que delimitan zonas representativas en el gráfico sumatorio.

Dichas líneas de gestión son conocidas como, el nivel de lleno del suelo **NLL**, la capacidad de campo **CC**, el punto de recarga **PR** y el punto de marchitamiento **PM**. (Figura 10)

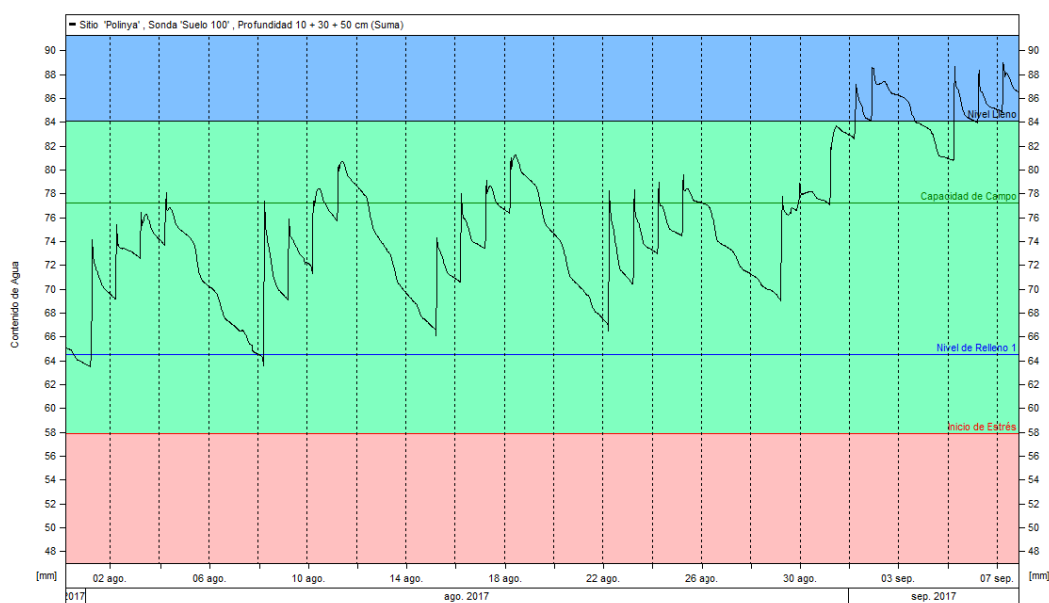


Figura 10: Gráfico sumatorio y líneas de gestión determinadas con Irrimax® 10



- a) **Nivel de lleno del suelo, NLL:** Se define como el nivel máximo de agua en el suelo sin que ocurran pérdidas profundas por gravedad. Para determinarlo, se usa el gráfico apilado con los 4 sensores, y tras un periodo de lluvia o riego abundante que sature el suelo se observan las variaciones en el último sensor (situado a 70 cm), las cuales indican unas pérdidas profundas. **(Ver Anejo 7, punto 2.4 a)**
- b) **Capacidad de campo del suelo, CC:** Se define como es la cantidad de agua que queda almacenada en el suelo tras un aporte excesivo y el drenaje libre. El CC se determina con las sondas de humedad durante el invierno, cuando la transpiración y la evaporación es mínima, de manera a que las pérdidas de agua sean exclusivamente por drenaje. Tras una lluvia importante y un drenaje de varios días (generalmente 3 días), se observa el nivel en que se ha estabilizado la humedad del suelo. **(Ver Anejo 7, punto 2.4 b)**
- c) **Punto de marchitamiento PM:** Se define como el nivel de agua en el suelo que resulta ser demasiado bajo para permitir una absorción radicular debido a la alta tensión del agua en el suelo. Se determina con Irrimax® con el gráfico sumatorio, observando una disminución de la absorción de agua por parte de la planta.  
En el caso de los riegos de alta frecuencia la humedad del suelo se mantiene siempre cerca del nivel de la capacidad de campo. Por lo cual el punto de marchitamiento PM, es difícilmente observable en las lecturas de las sondas. Por lo tanto, se suele usar los valores teóricos, siendo  $PM = 3/4 CC$ , o  $PM=2/3 CC$ .<sup>17</sup> Valores que se pueden ajustar según la experiencia y los resultados observados. También es aconsejado forzar una vez el estrés hídrico para corroborar estos valores. **(Ver Anejo 7, punto 2.4 c)**
- La diferencia en CC y PM, es donde se sitúa el agua útil, y donde la absorbancia de agua por parte de las raíces es idónea. No obstante, el intervalo donde se debe mantener la humedad del suelo es más reducido y se sitúa entre la capacidad de campo CC y el punto de recarga PR. De manera a nunca alcanzar una situación de estrés definida por el punto de marchitamiento.
- b) **Punto de recarga PR:** El punto de recarga corresponde al momento en el que se debe volver a regar de manera previa a alcanzar el punto de marchitamiento, definiendo la **frecuencia de riego**.  
Se puede determinar el punto de recarga a partir de las lecturas de las sondas de humedad, al observar una disminución de la absorción radicular en momento de máxima demanda evapotranspirativa, sin que se haya alcanzado el punto de marchitamiento. **(Ver Anejo 7, punto 2.4 d)**

## II. Programación del riego semanal a partir de la interpretación de las lecturas de la sonda EnviroScan® con Irrimax® 10

Para la programación semanal basada en las sondas de humedad, se procede de la misma manera que para la programación basada en los datos climáticos, es decir, se realiza una programación basada en las observaciones de la semana anterior.

---

<sup>17</sup> Los valores teóricos del punto de marchitamiento PM, que se utilizan para la determinación teórica de las líneas de gestión tienen como fuente la información de la empresa representante de Sentek® en Francia, Agralis®, y se basan en la investigación científica.

La programación semanal del riego se realiza con el grafico apilado, el grafico sumatorio y el grafico de las precipitaciones, en una misma ventana. Se evalúa para cada semana si la humedad del suelo se mantiene en los límites fijados (**Figura 11.a**). Se determina entonces la frecuencia (**Figura 11.b**) y la duración de cada riego (**Figura 11.c**). Se observa el comportamiento de la humedad del suelo tras cada riego, hasta que profundidad llega el riego, si llega a la zona de máxima absorción y si existen pérdidas profundas (**Figura 11.d**). Con esta información se realiza una programación para la semana siguiente. Determinando el número de riegos, el intervalo entre cada riego y el tiempo de cada riego necesarios para satisfacer a la demanda hídrica del cultivo. (**Ver Anejo 7, punto 3**)

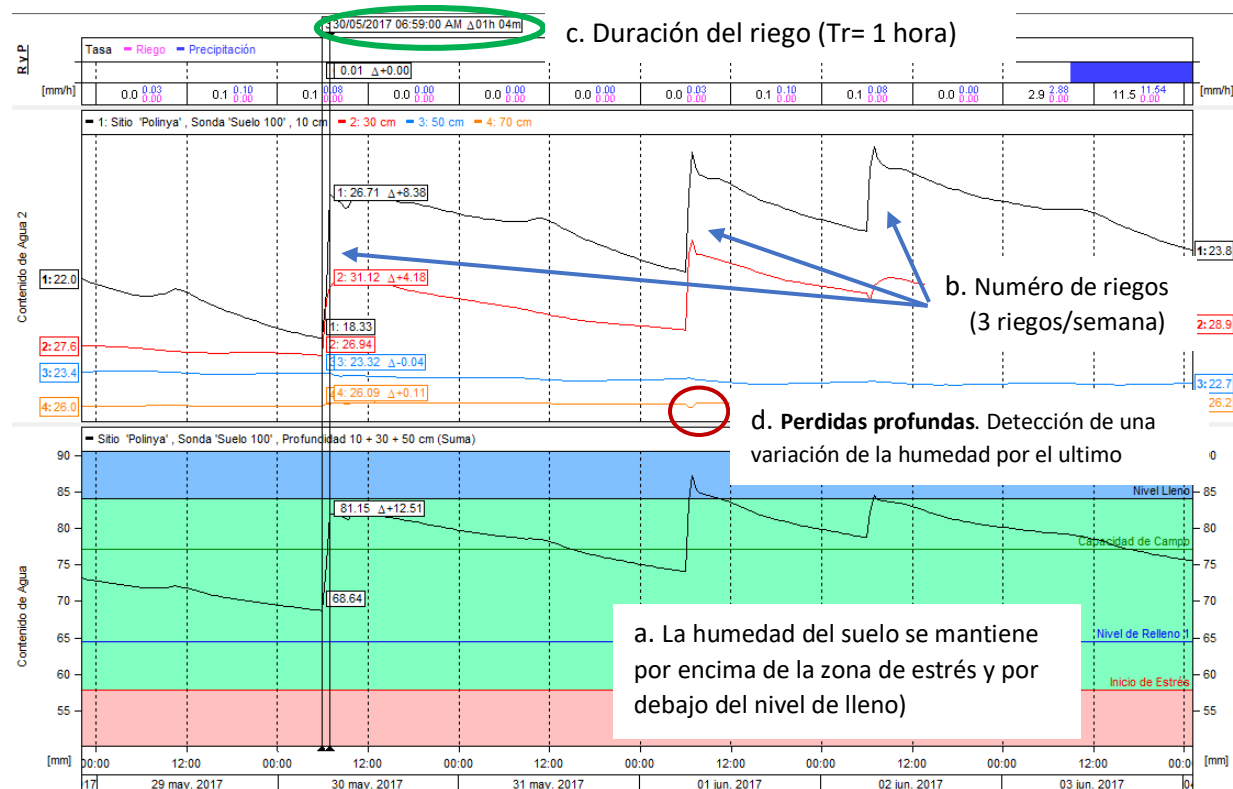


Figura 11: Información proporcionada por el Irrimax® 10 para la programación semanal del riego.

## 5.2. Segunda solución: la sonda de humedad 10HS de Decagon Devices®

La sonda 10HS de Decagon Devices® forma parte de una gama de tecnologías (ECH2O System®) para la medición de la humedad del suelo. La cual incluye sondas de humedad, datalogger y programas informáticos, compatibles entre sí. En este estudio se utilizan la sonda 10HS (**Figura 12.a**) y el datalogger Em50 (**Figura 12.a**) de Decagon Devices®. (**Ver Anejo 5, punto 2**)

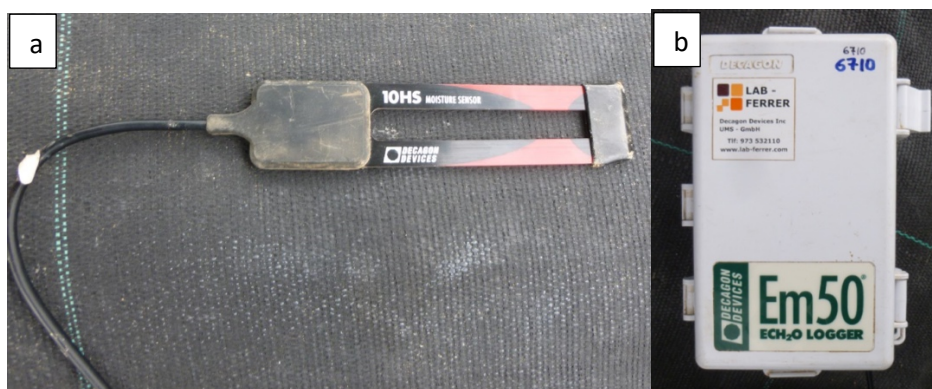


Figura 12: Sonda 10HS y datalogger Em50 de Decagon Devices®

a) Calibración de la sonda 10HS de Decagon Devices®

Con anterioridad a ser instalada en campo la sonda 10HS precisa de una calibración de manera a mejorar la precisión de las medidas de la sonda según la textura del suelo de la parcela de estudio.

Para ello, se ha recogido varias muestras de suelo de la parcela, se ha determinado su contenido volumétrico de agua con un método directo. Se han realizado entonces medidas de estas mismas muestras con la sonda 10HS. Se han las lecturas de la sonda con el contenido volumétrico de agua VWC determinado para cada muestra mediante una recta de regresión, obteniendo la ecuación de calibración. **(Ver Anejo 5, punto 3)**

b) Instalación en campo de la sonda 10HS de Decagon Devices®

La sonda 10HS se instala a una profundidad de 20 cm y a una distancia de 1 metro de un árbol representativo del cultivo, dentro del bulbo húmedo y dentro del caballón, pero no directamente debajo del gotero, de manera a tener una lectura representativa de la humedad del suelo a la cual están expuestas las raíces del árbol. También se sitúa la sonda al sur respecto del árbol, para evitar los efectos de la temperatura sobre la humedad del suelo. **(Ver Plano 6 – Instalación de la sonda 10HS en la parcela).**

Es posible realizar una lectura simultáneamente a varias profundidades de un mismo punto mediante la instalación de varias sondas 10HS a varias profundidades (hasta un máximo de 5 sondas por datalogger).

Las etapas de la instalación de la sonda en campo son las siguientes:

1. **Realizar una calicata de suelo:** Para instalar la sonda se realiza una calicata de suelo, con la ayuda de una azada, de 40 cm de profundidad y 30 cm de ancho, a proximidad del bulbo húmedo de un árbol representativo. La superficie adyacente al sensor tiene una gran influencia sobre su lectura, es importante evitar la compactación excesiva del suelo. **(Ver Anejo 5, punto 4.2)**
2. **Determinación del punto de anclaje de la sonda en el suelo:** Se mide con el metro, 20 cm desde la superficie del suelo, y se posiciona la sonda en el punto medio de la calicata, en posición perpendicular a la superficie del suelo. El sensor podría posicionarse en cualquier sentido, no obstante, al orientarlo en sentido perpendicular a la superficie del suelo, se consigue minimizar el efecto del agua de drenaje sobre la superficie de suelo medida por el sensor. **(Ver Anejo 5, punto 4.2)**
3. **Introducción de la sonda en el suelo:** Se introducen completamente las varillas de la sonda en el suelo, dejando sobrepasar únicamente la base de plástico de la sonda. Al tener dos varillas es importante que el suelo situado entre ellas sea lo más representativo posible. Se evita introducir el sensor con fuerza, ya que se puede romper fácilmente, y conviene evitar piedras, raíces o

tierra demasiado compacta, que podrían afectar a la medida del sensor. (Ver Anejo 5, punto 4.2)

4. **Recubrimiento de la calicata:** Se recubre la calicata con la misma tierra que se retiró, tratando de minimizar la compactación del suelo. (Ver Anejo 5, punto 4.2)

c) Instalación y configuración del datalogger Em50 de Decagon Devices®

Para configurar el datalogger Em50, se conecta la sonda 10HS al datalogger por medio del puerto específico, y se conecta este último a un ordenador mediante el puerto COM. (Ver Anejo 5, punto 4.3) Con el programa “ECH2O Utility” de Decagon Devices® se configuran los parámetros necesarios al funcionamiento adecuado de la sonda y del datalogger, la frecuencia de muestro y la referencia de las sondas conectadas. Se procede entonces a una verificación correcto funcionamiento de la instalación. (Ver Anejo 5, punto 4.3)

d) Recuperación de las lecturas de la sonda en campo

Al no disponer de un equipo de comunicación, es necesario recoger los datos desde el datalogger directamente en campo. Los datos se descargan desde el datalogger al ordenador con el programa “ECH2O Utility” en formato de fichero de Office Excel® (\*.xls). (Ver Anejo 5, punto 5)

e) Interpretación de las lecturas de la sonda 10HS de Decagon Devices®

La interpretación de los datos se realiza de forma muy similar que la interpretación con el Irrimax, de manera gráfica, con representaciones de los datos semanales y con la ayuda de líneas de gestión del riego. Con la diferencia de utilizar el gráfico en “nube de puntos unidos” del programa Office Excel® 2016. (Ver Anejo 8, punto 2.1)

## I. **Determinación de las líneas gestión con Office Excel® 2016**

- a) **Nivel de lleno del suelo, NLL:** Para determinar el nivel de lleno con la sonda 10HS, se observa el comportamiento de la humedad del suelo tras un aporte hídrico excesivo. Inmediatamente después del aporte, se observa una disminución de la humedad abrupta, debida a pérdidas por gravedad. Se busca entonces el momento en donde se estabiliza la humedad, y en que su disminución es debida a la absorción radicular. (Ver Anejo 8, punto 2.2 a)
- b) **Capacidad de campo del suelo, CC:** Se determina en invierno, tras un aporte hídrico importante y un drenaje de 3 días, se observa el nivel en que se ha estabilizado la humedad del suelo. (Ver Anejo 8, punto 2.2 b)
- c) **Punto de recarga PR:** Se determina el punto de recarga al observar una disminución de la absorción radicular en momento de máxima demanda evapotranspirativa, sin que se haya alcanzado el punto de marchitamiento. (Ver Anejo 8, punto 2.2 c)
- d) **Punto de marchitamiento PM:** Los valores teóricos del punto de marchitamiento son,  $PM = 3/4 CC$ , o  $PM = 2/3 CC$ .<sup>14</sup> (Ver Anejo 8, punto 2.2 d)

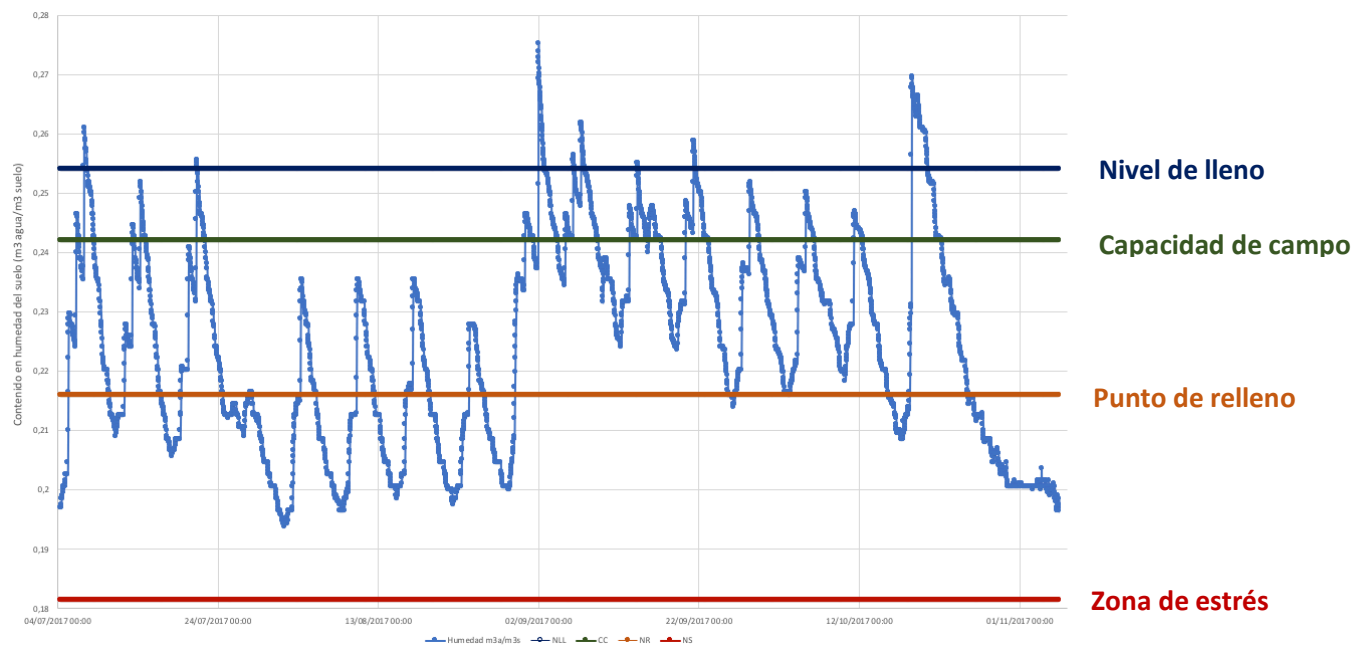


Figura 13: Resultados de las líneas de gestión, con Office Excel® 2016.

## II. Programación del riego semanal a partir de la interpretación de las lecturas de la sonda 10HS® con Office Excel® 2016.

Para realizar una programación del riego semanal, a partir de la representación gráfica de los datos de la sonda 10HS. Se evalúa para cada semana si la humedad del suelo se mantiene en los límites fijados, se determina entonces la frecuencia de riego (**Figura 9.a**) y la duración de cada riego (**Figura 9.b**). Se observa entonces el comportamiento de la humedad del suelo tras cada riego, si existe absorción radicular y cual la dinámica de la humedad del suelo tras cada riego. Con esta información se realiza una programación para la semana siguiente.

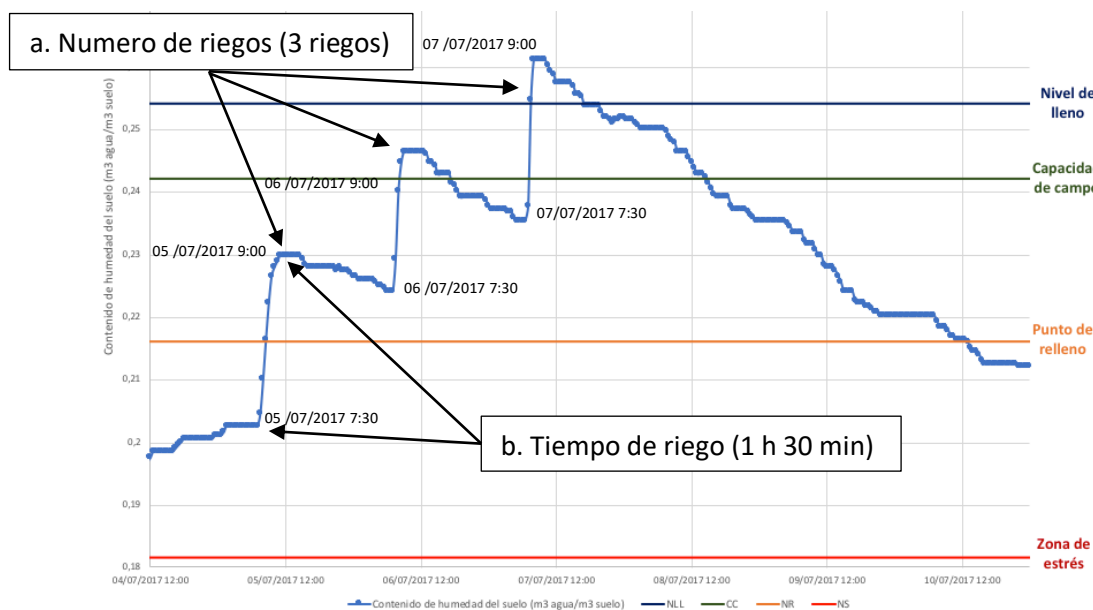


Figura 14: Representación grafica de las lecturas de la sonda 10HS, con Office Excel® 2016 para la programación semanal del riego

### 5.3. Opinión sobre el manejo de cada sonda de humedad

- **Facilidad de acceso a la tecnología**

La sonda 10HS presenta facilidades de acceso, pudiendo comprarse directamente, y a un precio económico.

La empresa Sentek® colabora en Europa con un vendedor único por país, para poder adquirir la sonda es necesario ponerse en contacto con la empresa vendedora y pedir un presupuesto. El coste de la solución tecnológica (sonda y equipos) es mucho mas alto.

- **Configuración de la sonda**

La sonda 10HS se puede configurar directamente en campo de manera sencilla.

La sonda EnviroScan® y el equipo de adquisición de datos y de comunicación presentan unas necesidades de configuración bastante exigentes. En este estudio, se tardó 3 horas en montar y en configurar la sonda en laboratorio.

- **Calibración de la sonda**

La calibración de la sonda 10HS es mas compleja, requiriendo un tiempo y unos experimentos adicionales.

La sonda EnviroScan® viene precalibrada para una serie de suelos de referencia, siendo la única calibración necesaria, húmedo y seco, bastante sencilla de realizar.

- **Instalación de la sonda en campo**

La instalación de la sonda 10HS en campo no presenta dificultades, se tardó en este estudio, 30 minutos para instalarla.

La instalación en campo de la sonda EnviroScan® es mas exigente, tanto en trabajo como en configuración. Se tardaron 3 horas en instalar y en configurar la sonda para este estudio.

- **Facilidad de obtención de los datos**

La recuperación de las lecturas de la sonda 10HS se realiza en campo, siendo necesario conectar un ordenador al datalogger para obtener los datos.

Las lecturas de la sonda EnviroScan® se recuperan directamente desde el servidor definido, siendo mucho mas sencillo su análisis en tiempo real o semanal. También existe la posibilidad de observar las lecturas de la sonda en tiempo real directamente desde un teléfono móvil, mediante la aplicación móvil específica.

- **Interpretación de las lecturas de las sondas**

La interpretación de los datos de la sonda 10HS presenta dificultades no despreciables, siendo necesario la concepción y el manejo de una hoja de calculo para realizarse. No obstante, la empresa Decagon Devices® ofrece un programa informático gratuito para la interpretación grafica de las lecturas de las sondas llamado DataTrac 3. No se ha utilizado dicho programa en este estudio por razones de conveniencia.

La interpretación de las lecturas de la sonda EnviroScan® con Irrimax® 10, ha resultado ser razonablemente sencillo, una vez dominado el programa informático. Dicho programa ofrece un abanico de posibilidades de análisis de los datos muy interesante en la investigación.

- **Robustez de los datos**

Se ha observado que las lecturas de la sonda 10HS eran bastante robustas respecto a las lecturas de la sonda EnviroScan®. Observándose lecturas similares en condiciones próximas. No obstante, la presencia de una única sonda 10HS a una única profundidad parece limitar la determinación de la dinámica del agua en el suelo. Para un mejor funcionamiento se aconseja instalar varias sondas a varias profundidades en un mismo punto. No obstante, esta configuración aumenta el precio de esta solución tecnológica.

En el caso de cada sonda, es necesario realizar en campo experimentos de varios meses para determinar líneas de gestión fiables.

- **Fiabilidad del sistema**

Se ha observado el funcionamiento de las dos soluciones tecnológicas a los 5 meses de instalarlas en campo. Las sondas EnviroScan® funcionaban con normalidad, mientras que de las 4 sondas 10HS solo funcionaba una. Se determinó que el problema era debido a falsos contactos en el cableado de las sondas 10HS.

## 6. APLICACIÓN EN CAMPO

En el **Anejo 6 aparta 3**, se ha realizado la programación del riego semanal basada en lo datos climáticos de la semana anterior durante las 21 semanas (de junio a octubre) de duración del estudio, siguiendo de la metodología FAO-56.

En el **Anejo 7 apartado 3**, se ha realizado la programación del riego semanal basada en las medidas del suelo de la sonda EnviroScan® de Sentek® de la semana anterior durante las 21 semanas (de junio a octubre) de duración del estudio.

En el **Anejo 8 apartado 3**, se ha realizado la programación del riego semanal basada en las medidas del suelo de la sonda 10HS de Decagon Devices® de la semana anterior durante 15 semanas (de julio a octubre).

En la tabla 2 se presentan los resultados semanales de la programación del riego basada en los datos climáticos para las 21 semanas de estudio, y en la tabla 3 se presentan los resultados mensuales.

Tabla 2. - Tabla recapitulativa de los resultados semanales del número de riego, el intervalo entre riegos, el tiempo de riego y la dosis de riego, de las programaciones del riego a partir de los datos climáticos, de las medidas de la humedad del suelo con la sonda EnviroScan y con la sonda 10HS

Sema na	Numero de riegos			Tiempo de riego (h/semana)			Dosis de riego (l/árbol y semana)		
	Clima	Enviro Scan®	10HS	Clima	EnviroS can®	10HS	Clima	EnviroS can	10HS
1	2	2	-	2,54	2,00	-	43,17	34,08	-
2	4	5	-	6,12	5,00	-	104,51	85,20	-
3	4	4	-	6,87	6,00	-	119,28	102,24	-
4	4	3	-	6,66	4,50	-	113,60	76,68	-
5	5	3	-	8,13	4,50	-	142,00	76,68	-
6	5	2	3	7,50	3,00	4,50	126,60	51,12	76,68
7	5	2	4	8,14	4,00	6,00	142,00	68,16	102,24
8	5	4	4	7,02	4,00	7,00	120,70	68,16	119,28
9	5	4	3	7,88	6,00	7,50	134,90	102,24	127,80
10	5	3	2	6,78	3,00	5,00	113,60	51,12	85,20
11	5	4	3	7,31	6,00	7,50	127,80	102,24	127,80
12	4	4	3	6,57	6,00	7,50	113,60	102,24	127,80
13	5	3	3	6,38	3,00	7,50	113,60	51,12	127,80
14	3	2	2	2,81	2,00	2,00	52,12	34,08	34,08
15	4	3	3	6,44	3,00	3,00	113,60	51,12	51,12
16	5	3	3	7,31	3,00	3,00	127,80	51,12	51,12



17	4	3	3	3,20	3,00	3,00	119,28	51,12	51,12
18	4	3	3	5,58	3,00	3,00	96,56	51,12	51,12
19	4	2	3	5,26	2,00	3,00	90,88	34,08	51,12
20	3	2	3	4,38	2,00	3,00	76,68	34,08	51,12
21	2	0	-	2,31	0,00	0,00	39,76	0,00	0,00

Tabla 3. - Tabla recapitulativa de los resultados mensuales y totales del número de riego, el intervalo entre riegos, el tiempo de riego y la dosis de riego, de las programaciones del riego a partir de los datos climáticos, de las medidas de la humedad del suelo con la sonda EnviroScan y con la sonda 10HS

Mes	Numero de riegos			Tiempo de riego (h/mes)			Dosis de riego (l/árbol y mes)		
	Clima	Enviro Scan®	10HS	Clima	Enviro Scan®	10HS	Clima	EnviroScan®	10HS
Junio	19,0	17,0	-	30,3	22,0	-	522,5	374,9	-
Julio	25,0	15,0	16,0	37,3	20,0	30,0	637,8	340,8	511,2
Agosto	22,0	16,0	13,0	29,8	20,0	29,5	520,7	340,8	502,7
Septiembre	21,0	14,0	15,0	27,8	14,0	15,0	548,1	238,5	255,6
Octubre	9,0	4,0	6,0	11,9	4,0	6,0	207,3	68,1	102,2
<b>Total</b>	<b>96,0</b>	<b>66,0</b>	<b>50,0</b>	<b>137,2</b>	<b>80,0</b>	<b>80,5</b>	<b>2436,5</b>	<b>1363,2</b>	<b>1371,7</b>

#### 6.1. Comparaciones de los parámetros determinantes obtenidos con los distintos métodos de programación del riego

En el **anejo 9**, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos de los distintos tipos de programación del riego que se han realizado en este estudio. La programación basada en los datos climáticos (Anejo 6) y la programación basada en las medidas de humedad del suelo, con la sonda EnviroScan® de Sentek® (Anejo 7) y la sonda 10HS de Decagon Devices® (Anejo 8).

Las comparaciones se han realizado mediante un análisis de varianza ANOVA y un test de LSD con ( $p < 0,05$  y  $p < 0,01$ ). Los test estadísticos se realizan gracias al programa informático R v. 3.4.3.

##### a) Comparación entre las lecturas de la humedad del suelo de las sondas

Para determinar la fiabilidad de las lecturas de la sonda 10HS respecto a las de la sonda EnviroScan®, se ha realizado una comparación estadística de las lecturas de cada sonda. (**Ver Anejo 9, punto 2.2**)

La comparación ha mostrado resultados estadísticamente similares entre las medidas de la sonda 10HS situada a 20 cm y el sensor de la sonda EnviroScan® situado a 10 cm. Este experimento no permite determinar si la humedad del suelo es igual a 10 que, a 20 cm, ni si las sondas miden lo mismo, al tener dos tipos de sonda a dos profundidades diferentes. No obstante, se ha validado la fiabilidad de las lecturas de la sonda 10HS.

Sería interesante reiterar este experimento, con varias sondas 10HS situadas a las mismas profundidades que los sensores EnviroScan®, de manera a determinar de forma más precisa, la diferencia de humedad del suelo entre los 10 y 20 cm, y las diferencias de lectura entre las dos sondas.

*b) Comparación entre los distintos métodos de programación del riego*

Se ha realizado en el **Anejo 9, apartado 2.1**, una comparación semanal y mensual de los distintos factores determinados con cada programación semanal realizado en los anejos 6, 7 y 8, individualmente, el numero de riegos  $N_R$ , el intervalo entre riegos  $I_R$ , el tiempo de riego  $T_R$  y la dosis de riego  $D_R$ .

En este análisis no se toman en cuenta las primeras cinco semanas del mes de junio, debido a que la sonda 10HS no registro medidas de humedad durante este periodo.

• **Frecuencia del riego. (Ver Anejo 9, punto 2.1.1 y 2.1.2)**

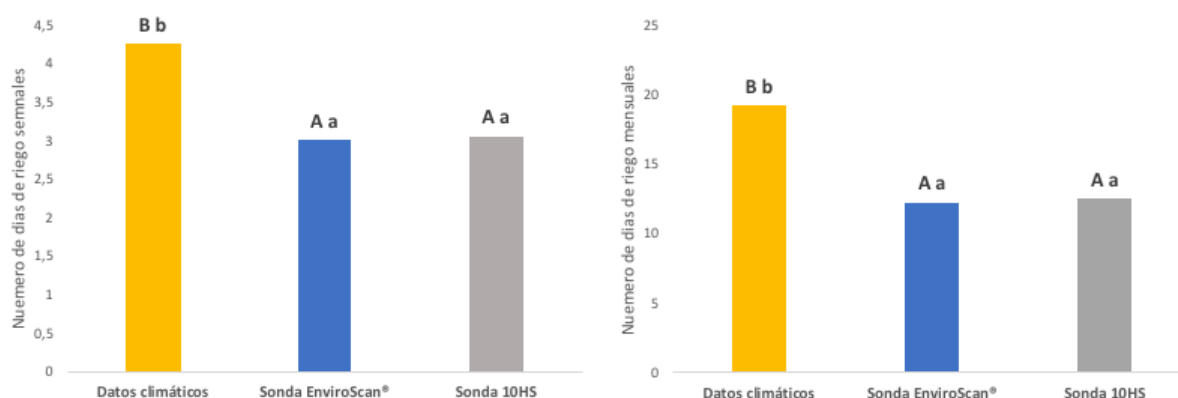


Figura 15: Numero de días de riego promedios, semanales y mensuales según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas  $p < 0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a  $p < 0,01$ )

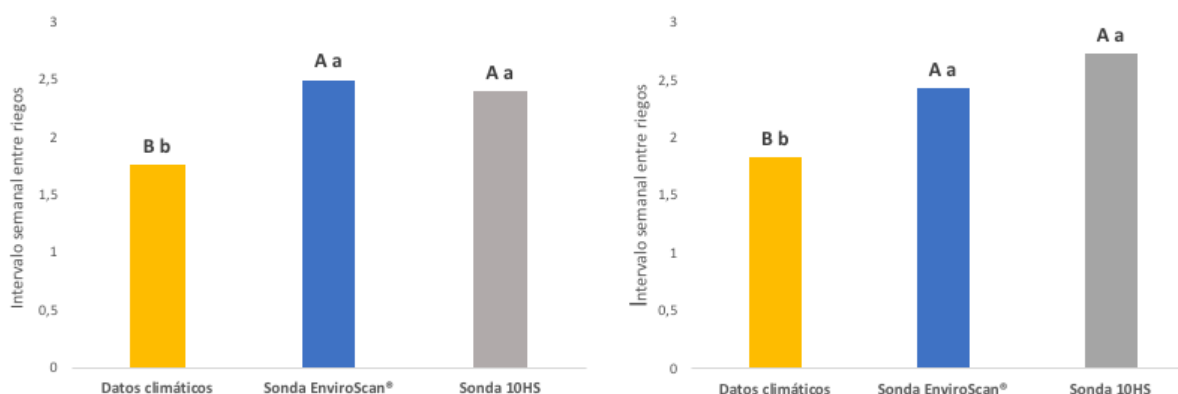


Figura 16: Intervalo entre riegos semanal promedio, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas  $p < 0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a  $p < 0,01$ )

Se observa que, con la programación del riego basado en las sondas de humedad, la frecuencia de riego semanal y mensual es menor que con la programación del riego basada en los datos climáticos. Las dos sondas de humedad, 10HS y EnviroScan® indican una frecuencia de riego semanal y mensual similares.

- **Tiempo y dosis de riego. (Ver Anejo 9, punto 2.1.3 y 2.1.4)**

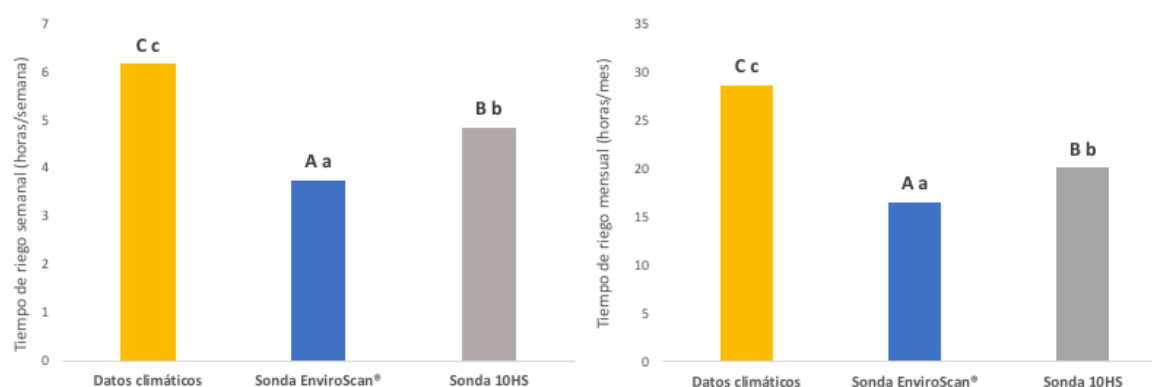


Figura 17: Tiempo de riego promedio semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas  $p < 0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a  $p < 0,01$ )

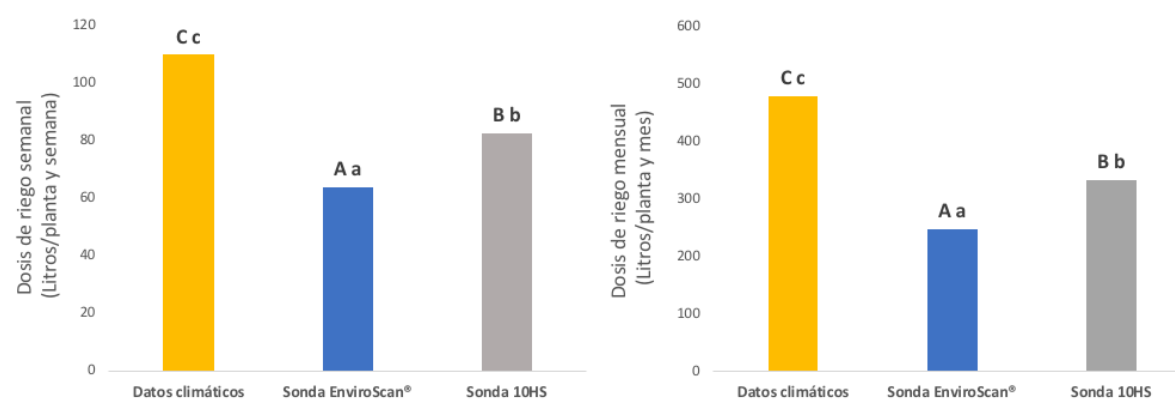


Figura 18: Dosis de riego promedio, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método. (Las letras mayúsculas indican diferencias significativas  $p < 0,05$ , las letras minúsculas indican diferencias significativas a  $p < 0,01$ )

Se observa que, con la programación del riego basado en las sondas de humedad, el tiempo de riego y la dosis de riego, semanal y mensual es menor que con la programación del riego basada en los datos climáticos. La programación con la sonda EnviroScan® indica un tiempo de riego y una dosis de riego, semanal y mensual menor que los dos otros métodos de programación, mientras que con la sonda 10HS, se obtiene un tiempo de riego y una dosis de riego intermedio.

## 6.2. Determinación del ahorro de agua con una programación del riego basada en medidas de la humedad del suelo respecto a una programación basada en datos climáticos

Se ha determinado en el **Anejo 9, apartado 2.2**, que la dosis de riego determinada con la programación del riego de la sonda EnviroScan® presenta un ahorro de agua promedio sobre el periodo de estudio del **41,2 %** respecto a la programación con datos climáticos. Los meses de mayores diferencias son junio, septiembre y octubre con 45, 55 y 60 % de diferencias respectivamente, y los meses de menor diferencias son junio y agosto, con 28% y 34,5 % respectivamente.

Las dosis de riego determinadas con la programación de la sonda 10HS, se comportan de forma similar, se observa un ahorro de agua promedio sobre el periodo de estudio del **27 %** respecto a la programación con datos climáticos. Los meses de mayores diferencias son septiembre y octubre con 55,3 y 39 % de

diferencias respectivamente, y los meses de menor diferencia son julio y agosto, con 19 y 3,5% de diferencias respectivamente.

Se observa que las diferencias en la dosis de riego entre los distintos métodos no son constantes a lo largo de los meses, siendo posible un efecto mensual o incluso semanal en la dosis de riego determinada con los distintos métodos. Cabe la posibilidad que ello sea debido a factores climáticos como las precipitaciones, aunque no se ha verificado esta hipótesis en este estudio.

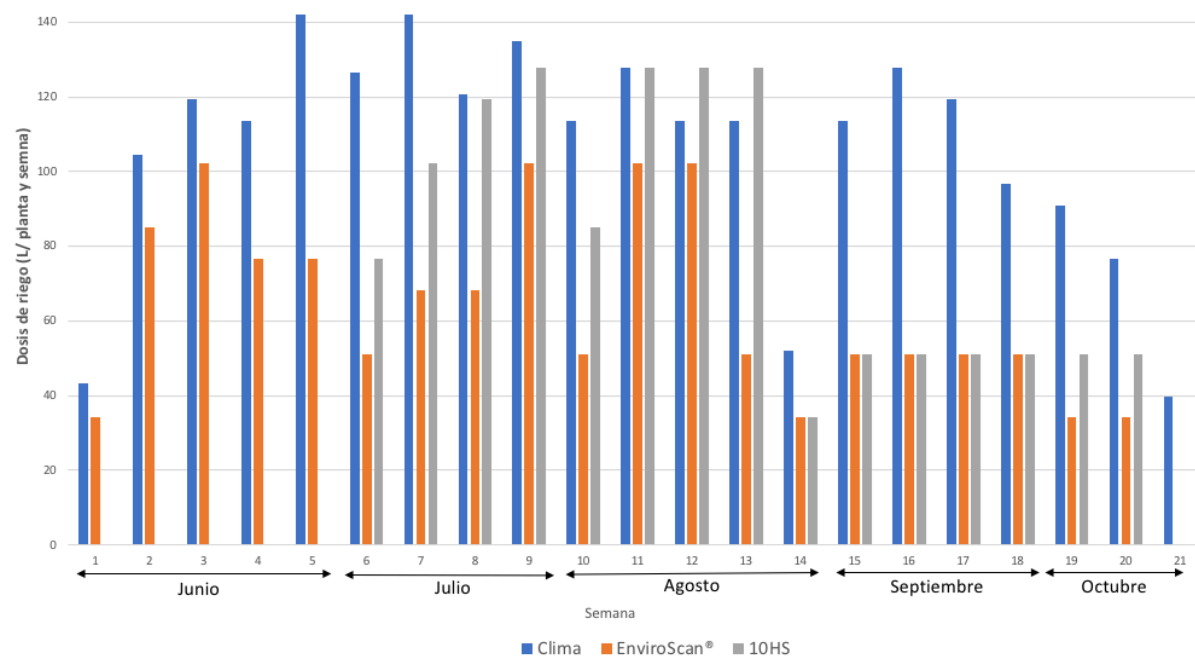


Figura 19: Dosis de riego promedio, semanal y mensual según la programación del riego basada en cada método.

## 7. RECOMENDACIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO BASADA EN LA SONDAS

- Se ha observado en el análisis de las lecturas de cada sonda (Anejo 7 y 8), unas diferencias interesantes en cuanto a la absorción radicular de la planta. Durante la programación semanal con la sonda 10HS, se ha observado una gran actividad radicular a 20 cm. Mientras que en el análisis de las lecturas de la sonda EnviroScan®, la absorción radicular era observable a 10 cm, pero muy leve o incluso nula a 30, 50 y 70 cm. Es muy probable, que por la configuración del cultivo (árboles jóvenes en caballón y con riego localizado), las raíces activas del cultivo se sitúan en los primeros 30 cm.

Por lo tanto, se piensa que la configuración de la sonda EnviroScan® instalada en el campo no es óptima, con sensores a 10, 30 50 y 70 cm, para el cultivo en cuestión. Es muy probable que durante la programación semanal del riego basada en dicha sonda se haya estado menospreciando las necesidades hídricas del cultivo. Y por lo tanto, los ahorros de agua determinados en este estudio, 40 %, sean exagerados.

Se aconseja cambiar la configuración de la sonda EnviroScan®, situando sensores a 10, 20, 30 y 50 cm, de manera a representar mejor la disposición de las raíces absorbentes del cultivo.

- La presencia de una única sonda 10HS, no parece ser suficiente para programar el riego de manera óptima, ya que no se observan las pérdidas profundas. Se aconseja situar como mínimo una sonda 10HS a mayor profundidad (40 cm) de manera a observar las pérdidas profundas de los riegos excesivos.
- Para la utilización de las sondas de humedad para la programación del riego, se aconseja instalar en campo dichas sondas cuando el cultivo es latente. La determinación de las características del suelo mediante las líneas de gestión es el factor determinante para el uso óptimo de las sondas. Para determinar dichas líneas de gestión, son necesarios ensayos y observaciones, durante varias épocas del año. Así como realizar experimentos, forzando los excesos de riego y provocando el estrés del cultivo, de manera a observar la respuesta del suelo y del cultivo. También es interesante repetir estos experimentos en varias épocas del año y fase de cultivo, para afinar las líneas de gestión determinadas.

Las sondas de humedad han resultado ser una gran herramienta para facilitar la programación del riego mediante la visualización directa de la dinámica del agua en suelo, sin necesidad de realizar cálculo adicionales. La programación del riego basado en las sondas de humedad ha permitido un ahorro importante en la dosis de riego respecto al método climático. Además, de indicar la necesidad riegos mas o menos frecuentes según la humedad del suelo.

La sonda EnviroScan® ha presentado grandes ventajas en cuanto a facilidad de utilización frente a la sonda 10HS. Las lecturas de la sonda eran enviadas cada hora al servidor, y eran directamente interpretables gracias al programa Irrimax®. Cabe destacar la posibilidad de observar las lecturas de la sonda EnviroScan® directamente desde el teléfono móvil mediante la aplicación específica. Lo cual la convierte en una herramienta de ayuda a la decisión de fácil uso en las explotaciones comerciales.

No obstante, el alto coste de esta tecnología es seguramente una barrera para muchos productores y más en la zona de estudio, que presenta una estructura productiva representada por el minifundismo. Aunque, presente dificultades de uso y de interpretación de los datos, la programación del riego con la sonda 10HS, ha permitido realizar un ahorro de agua importante de 27 % en la dosis de riego respecto al método climático. Aunque no parezca tener las capacidades de la sonda EnviroScan® en cuanto a

gestión y control del riego, esta sonda seguramente sea una alternativa viable para el ahorro hídrico en explotaciones pequeñas.

### 7.1. Valoración económica

En este apartado se valora el precio de la adquisición de las sondas y su puesta en funcionamiento en campo.

Se considera un precio por hora de 20 €/h para operarios y 30 €/h para técnico especialista.

#### *a) Adquisición e instalación de la sonda EnviroScan® de Sentek®*

La configuración de la sonda costo 3 horas, considerando la necesidad de un técnico especialista para esta tarea, se estima un coste de configuración de 90 €.

La instalación de la sonda en campo costo 3 horas, considerando la necesidad de la presencia de un operario y un técnico especialista para las distintas tareas que conlleva la instalación, se estima un coste de instalación de 150 €.

Para la interpretación de los datos, existe una alternativa al programa Irrimax®10, ofrecida por la propia empresa Sentek®, se trata de la aplicación web gratuita Irrimax® Live<sup>18</sup>. La empresa también ofrece una aplicación móvil que permite observar en tiempo real las lecturas de la sonda.

Se considera, que la adquisición de la licencia del programa Irrimax® 10, es facultativa para explotaciones comerciales. No obstante, las posibilidades de análisis que ofrece el programa son a tomar en cuenta si se destina a la investigación.

A continuación, se realiza una valoración económica a partir de un presupuesto del vendedor.

<b>Equipo</b>	<b>Precio €</b>
1 Sonda EnviroScan® con 4 sensores	1000,00
1 Equipo de adquisición de datos	850,00
1 Modem	250,00
1 Panel solar	350,00
Material adicional para la instalación en campo	50,00
Equipo adicional (cableado, etc...)	30,00
Tarjeta SIM datos (fax) GSM. Precio mensual €/mes	10,00
<b>Precio de la sonda y del equipo</b>	<b>2.530,00</b>
Coste de configuración	90,00
Coste de la instalación en campo	150,00
<b>Precio de la instalación</b>	<b>240,00</b>

---

<sup>18</sup> IrriMAX Live. (<http://www.irrimaxlive.com>)

<b><u>Total sin la licencia Irrimax® 10</u></b>	<b><u>2.770,00</u></b>
Licencia Programa Irrimax® 10	533,00
<b><u>Total con la licencia Irrimax® 10</u></b>	<b><u>3.303,00</u></b>

El precio de adquisición e instalación de una sonda EnviroScan es de **2770,00 €** sin la licencia del programa Irrimax® 10 y **3.303,00 €** con la licencia. El precio del servidor y comunicación GSM es de unos 10 €/mes.<sup>19</sup>

*b) Adquisición e instalación de la sonda 10HS de Decagon Devices®*

Se tardó 1 hora en instalar y configurar la sonda en campo, considerando la necesidad de un operario y un técnico especialista para estas tareas, se estima un coste de configuración y de instalación de 50 €.

A continuación, se realiza una valoración económica de la instalación de la sonda 10HS.

<b>Equipo</b>	<b>Precio €</b>
1 Sonda 10 HS	120,00
1 Datalogger Em50	200,00
Material adicional para la instalación en campo	30,00
<b>Precio de la sonda y del equipo</b>	<b>350,00</b>
<b>Precio de la instalación y configuración</b>	<b>50,00</b>
<b><u>Total</u></b>	<b><u>400 €</u></b>

El precio de adquisición e instalación de una sonda 10HS y del datalogger Em50 es de **400 €**.

*c) Estimación del coste de ahorro en agua anual*

Considerando un precio estimado del agua de riego en la comunidad valenciana a fecha de marzo de 2018, de 0,18 €/m<sup>3</sup>.<sup>20</sup>

Se ha estimado un ahorro promedio en la dosis de riego con la sonda EnviroScan® del 40 % y un 25% con la sonda 10HS.

El coste del ahorro de agua de riego con la sonda EnviroScan® son **0,072 €/m<sup>3</sup>**, y **0,045 €/m<sup>3</sup>** con la sonda 10HS.

<sup>19</sup> Es muy probable que la extensión en el uso de las sondas de humedad de la marca Sentek® en la agricultura provoque una bajada de precio de los equipos. En Francia, la empresa Agralis® comercializa actualmente modelos de sondas capacitivas mas recientes a un precio de 1750 €.

<sup>20</sup> Precio estimado a partir del precio del agua de riego en Picassent, proveniente del canal de Júcar Turia en Valencia.